

Año 11

Número 1

Enero – Julio 2025



RECURSOS NATURALES Y SOCIEDAD



REVISTA DIGITAL DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

Ciencia y
Tecnología



CIB

CENTRO DE INVESTIGACIONES
BIOLÓGICAS DEL HORDISTE S.L.



RECURSOS NATURALES Y SOCIEDAD, es una publicación arbitrada de divulgación científica digital iniciativa del **CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS DEL NOROESTE S.C. (CIBNOR-SECIHTI)**, Centro Público de Investigación de **SECIHTI**, Av. Instituto Politécnico Nacional 195, La Paz, Baja California Sur, C. P. 23096, Tel (612) 12 38484, <http://www.cibnor.gob.mx/revista-rns/> aortega@cibnor.mx. Editor en Jefe responsable Dr. Alfredo Ortega-Rubio. Editores Ejecutivos: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez y Dr. José Arturo Sánchez Paz. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2016-100710152500-20; ISSN: 2448-7406. Ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura de los editores de la publicación. Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de esta publicación sin previa autorización de los autores de este número de **RECURSOS NATURALES Y SOCIEDAD**.

Con deferente gratitud **RECURSOS NATURALES Y SOCIEDAD** reconoce y agradece la colaboración de la Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco en la edición gráfica editorial para esta revista, de la Lic. Adriana Landa Blanco en la elaboración del Logotipo y del Lic. Oscar Fischer Dorantes en la elaboración y actualización de la página WEB.

Editorial

Recursos Naturales y Sociedad
2025. Vol. 11(1): V-VIII.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0000>

En 2011, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) publicaron la Encuesta sobre la Percepción Pública de la Ciencia y la Tecnología (ENPECyT) en México. Los datos fueron, sin duda, abrumadores. De acuerdo con los resultados, el 55.67% de las personas encuestadas, en 3,200 viviendas a ciudadanos mayores de edad, consideró que los científicos son peligrosos debido a sus conocimientos, y el 55.39% manifestó que el desarrollo científico y tecnológico propicia una forma de vida artificial y deshumanizada. Además, el 72.24% de los encuestados considera la acupuntura, la quiropráctica, la homeopatía y las limpias como medios válidos para el tratamiento de algunas enfermedades.

Llama la atención que, en el vertiginoso mundo en el que habitamos hoy, aún pocas personas reconozcan la inmensa importancia de la ciencia moderna que, a través de las innumerables horas de trabajo y perseverancia de las personas científicas, ha transformado nuestra existencia y la forma en que comprendemos el mundo. Hoy sería impensable vivir sin radio, televisión, internet, autos, refrigeradores, aires acondicionados, vacunas, medicamentos, microondas, teléfonos celulares, alimentos, computadoras, rayos x, agua potable, productos para higiene personal, entre muchos otros bienes que nos brindan salud y confort. Cada logro de la ciencia ha permitido superar creencias profundamente arraigadas (y ha puesto otras en entredicho).



La ciencia puede ser profundamente cautivadora, sobre todo si aún somos capaces de maravillarnos al observar, comprender y valorar la belleza del espectáculo natural que nos rodea.

Cada uno de los artículos que incluidos en este número de Recursos Naturales y Sociedad nos introducen a temas que brindan la oportunidad de comprender diversos aspectos de la naturaleza y valorar el quehacer de las científicas y los científicos que compartieron sus conocimientos de forma clara, amena y comprensible.

A cada una y cada uno de ellos les extendemos nuestro más sincero agradecimiento por su valiosa contribución. El propósito de esta revista es compartir el valor de la ciencia, y ello solo es posible gracias a la dedicación y esfuerzo de las y los autores de estos artículos.

Sinceramente,

Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editor Ejecutiva

Dr. José Arturo Sánchez Paz

Editor Ejecutivo

Dr. Alfredo Ortega-Rubio

Editor en Jefe

Verano 2025

Editorial

Recursos Naturales y Sociedad
2025. Vol. 11(1): V-VIII.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0000>

In 2011, the National Council for Science and Technology (CONACyT) and the National Institute of Statistics and Geography (INEGI) published the Survey on Public Perception of Science and Technology (ENPECyT) in Mexico. The data was, without a doubt, overwhelming. According to the results, 55.67% of those surveyed, in 3,200 households of adult citizens, considered scientists dangerous due to their knowledge, and 55.39% stated that scientific and technological development fosters an artificial and dehumanized way of life. Furthermore, 72.24% of those surveyed considered acupuncture, chiropractic, homeopathy, and cleansing as valid means for treating some illnesses.

It is striking that, in the fast-paced world we live in today, few people recognize the immense importance of modern science, which, through the countless hours of work and perseverance of scientists, has transformed our existence and the way we understand the world. Today, it would be unthinkable to live without radio, television, the internet, cars, refrigerators, air conditioners, vaccines, medicines, microwaves, cell phones, food, computers, x-rays, drinking water, personal hygiene products, among many other goods that provide us with health and comfort. Every scientific achievement has allowed us to overcome deeply held beliefs (and has challenged others).

Science can be deeply captivating, especially if we are still capable of marveling when observing, understanding, and appreciating the beauty of the natural spectacle that surrounds us.



Each of the articles included in this issue of Recursos Naturales y Sociedad introduces us to topics that offer the opportunity to understand various aspects of nature and appreciate the work of the scientists who shared their knowledge in a clear, engaging, and understandable way.

To each and every one of them, we extend our sincere gratitude for their valuable contribution. The purpose of this journal is to share the value of science, and this is only possible thanks to the dedication and effort of the authors of these articles.

Yours sincerely,

Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Executive Editor

Dr. José Arturo Sánchez Paz

Executive Editor

Dr. Alfredo Ortega-Rubio

Editor in Chief

Summer 2025

Dr. Alfredo Ortega Rubio Director General
Dr. Bernardo Murillo Amador Director de Gestión y Desarrollo Institucional
Dra. Alejandra Nieto Garibay Directora de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos
Coordinadores Programas Académicos
Dra. Danitzia Adriana Guerrero Tortolero Acuicultura
Dra. Crisalejandra Rivera Pérez Ecología Pesquera
Dr. Alejandro López Cortes Planeación Ambiental y Conservación
Dr. Luis Guillermo Hernández Montiel Agricultura Zonas Áridas
Coordinaciones
M. en C. Jesús Alfredo De la Peña Morales Vinculación, Innovación y Transferencia de Conocimiento a la Sociedad (COVITECS)
Dra. Paola Magallón Servín Programa de Acercamiento de la Ciencia a la Educación (PACE)
M. en C. Baudilio Acosta Vargas Coordinación de Atención Interna Especializada (CATIE)
Ing. Edgar Yuen Sánchez Unidad de Tecnología de la Información y Comunicaciones
Unidades Foráneas
Dr. Raúl López Aguilar Unidad Guerrero Negro
Dr. Alfonso Nivardo Maeda Martínez Unidad Nayarit
Dr. Alfredo Arreola Lizárraga Unidad Guaymas
Ing. Juan Bautista Vega Peralta Unidad Hermosillo
Administración
CP. Martha Verónica González Velázquez Unidad de Administración y Finanzas
CP. Roberto Picos García Subdirector de Finanzas y Contabilidad
MC. Rafael Palomeque Morales Subdirector de Recursos Materiales y de Servicios
CP. Juan Carlos González Cota Subdirector de Recursos Humanos
CP. Liz Aleida Cota Almazán Subdirectora de Contabilidad
MC. Luis Gómez Castro Subdirector de Planeación
Lic. Carlos Félix Subdirector Jurídico
Lic. Cinthya Castro Iglesias Jefa del Departamento de Extensión y Divulgación Científica
Lic. Dalia Villavicencio Siqueiros Jefa del Departamento de Eventos
Lic. Ana María Talamantes Cota Jefa del Centro de Información Biblioteca

Año 11	Número 1	Enero - Julio de 2025
Editorial.....		V
Artículos		
Explorando el misterioso universo viral: La virósfera y su materia oscura. <i>Norah Elisa Lee-Lara, Fernando Mendoza-Cano, Arturo Sánchez-Paz y Trinidad Encinas-García.....</i>		1
Elementos esenciales para la vida, pero solo en su justa medida. <i>Dulce L. Ambriz Pérez, Carmen C. Osuna Martínez y Magdalena E. Bergés Tiznado.....</i>		21
Usos del tejocote (<i>Crataegus mexicana</i>) en México desde la época prehispánica hasta la actualidad: Relevancia de sus usos medicinales y su potencial desarrollo farmacológico. <i>Maira Huerta-Reyes y Santiago Xolalpa-Molina.....</i>		33
Una Salud en Baja California Sur: Reflexiones y propuesta estratégica. <i>Carlos Angulo, Daniela A. Murillo-Cisneros, Elizabeth Monreal-Escalante, Alejandro M. Maeda-Martínez, Ramón Gaxiola-Robles, Hassian León-Montoya y Tania Zenteno-Savín.....</i>		44
La genética de la conservación aplicada: el caso de berrendo peninsular. <i>Anastasia Klimova y Jesús Neftalí Gutiérrez Rivera.....</i>		73
Implicaciones funcionales del uso del maxilar superior (pico) del marlín rayado en su estrategia alimentaria. <i>Leonardo Andrés Abitia-Cárdenas, Marcial Trinidad Villalejo-Fuerte, Víctor Hugo Cruz-Escalona y Jesús Rodríguez-Romero.....</i>		90
Sorprendentes respuestas moleculares en artrópodos durante la hipoxia. <i>Martín Octavio Pérez Aragón y Olivert Martínez Cruz.....</i>		107
Influencia de los macronutrientes y aditivos funcionales en la reproducción de peces marinos. <i>Marco A. Hernández-de Dios, Minerva C. Maldonado-García, Deneb Maldonado-García y Francisco Encarnación-Ramírez.....</i>		117
Ostión triploide CIBNOR: Investigación y vinculación con el sector ostrícola de Baja California Sur. <i>Pedro Cruz-Hernández, Héctor Acosta-Salmón, Fernando Aranceta-Garza, José Luis Ramírez-Arce, Ismael Sánchez-Brito y Carolina Sánchez-Verdugo.....</i>		140
Cerveza por aquí, cerveza por allá, pero ¿y dónde queda el desecho? <i>Gabriela Aguilar Zárate, Irma E. Martínez Rodríguez y David U. Santos Ballardo.....</i>		158
Plantas de laboratorio: clonación in vitro. <i>Marco A. Ramírez-Mosqueda, Jorge D. Cadena-Zamudio; Esmeralda J. Cruz-Gutiérrez y Gregorio Arellano-Ostoa.....</i>		175

Los arrecifes coralinos del Golfo de California ante el cambio climático. <i>Paulina Martínez-Sarabia, Tania Zenteno-Savín, Fausto Valenzuela-Quíñonez y Héctor Reyes-Bonilla.....</i>	183
Economía circular: Respuesta a la crisis de manejo de residuos. <i>Selene Ortíz Velazquez, Iván Cervantes-Zepeda, David García-Mondragón, Iván Gallego-Alarcón y Gehovana González-Blanco.....</i>	198
Dormir volando: una estrategia única y sus implicaciones para la conservación de aves marinas. <i>María Ariadna Pérez Hernández, Cecilia Soldatini y Yuri V. Albores-Barajas.....</i>	216
Enfoque de Una Salud en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), S. C. Memorias del Primer Foro Una Salud: Diálogos, Debate y Conciencia. <i>Carlos Angulo, Ilie S. Racotta, Salvador E. Lluch-Cota, Elizabeth Monreal-Escalante, Daniela A. Murillo-Cisneros, Cinthya Castro y Tania Zenteno-Savín.....</i>	226
Peces, bacterias y microbiota. <i>Edén Vladimir Gaitán-Morado y Antonio Luna-González.....</i>	246
El compostaje de palma canaria y lirio acuático: alternativa para reducir problemas ambientales y de suelo. <i>Dionicio Alvarado-Rosales, Luz de Lourdes Saavedra-Romero, Sandra Fabiola Mares-Flores, Óscar Mikhail Mares-Flores, Edgar Omar Rodríguez-Martínez y Jorge Alonso Maldonado-Alicona.....</i>	259
Vacunas pequeñas, alas grandes. <i>Hassian León y Carlos Angulo.....</i>	272
Ecosistemas de carbono azul en Chiapas, México: la relevancia de su conservación. <i>Carolina Velázquez-Pérez, José A. Arreola Lizarraga, Pablo Marroquín Morales y Emilio I. Romero-Berny.....</i>	288
En memoria de: Dr. Humberto Villarreal Colmenares (1960 – 2025). <i>Edilmar Cortés-Jacinto, Alejandra Villarreal García y José Naranjo Páramo.....</i>	305



Exploring the mysterious viral universe:
The virosphere and its dark matter

Explorando el misterioso universo viral: La virósfera y su materia oscura

Norah Elisa Lee-Lara², Fernando Mendoza-Cano¹,
Arturo Sánchez-Paz¹ y Trinidad Encinas-García^{1*}

Resumen

Desde su descubrimiento, los virus han sido un tema de fascinación y estudio. Inicialmente, fueron descritos por su capacidad para causar enfermedades, sin embargo, hoy se sabe son necesarios e importantes para los ecosistemas debido a su complejidad y diversidad. El Comité Internacional de Taxonomía de Virus (ICTV, por sus siglas en inglés), ha descrito a los virus como elementos genéticos móviles que codifican al menos una proteína clave para encapsular su ácido nucleico y que, además, necesitan un hospedero para replicarse. También, los virus son los entes acelulares más abundantes y genéticamente diversos, lo cual, está estrechamente relacionado con la abundancia y diversidad de sus hospederos. Es por esto que, los virus son una de las principales causas de mortalidad en los océanos, matando diariamente el 20% de la biomasa marina mediante 10^{23} infecciones virales por segundo, como resultado, el 25% del carbono en los océanos fluye a través de la deriva viral haciéndolos esenciales para los ecosistemas. A pesar de su mala reputación, los virus ayudan a controlar y equilibrar los ecosistemas acuáticos, regulando el tamaño de las poblaciones de sus hospederos y “obligándolos” a que coexistan en equilibrio, contribuyendo a la resiliencia del ecosistema. Finalmente, aunque se ha avanzado significativamente en la comprensión de la complejidad y diversidad de los virus, la información sobre la “materia oscura viral” es escasa.

Palabras clave

Virus, hospedero, ecosistema marino, procariota, abundancia, diversidad.

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Campus Hermosillo. Hermosillo, Sonora, C.P. 83106 México

² Universidad de Sonora. Av. Colosio s/n, entre Sahuaripa y Reforma. Hermosillo, Sonora 83000, México.

* Autor de correspondencia: E-mail: tencinas@cibnor.mx



Abstract

Since their discovery, viruses have been a subject of fascination and study. Initially, they were described for their ability to cause disease. However, nowadays, due to their complexity and diversity, they are known to be necessary and important for ecosystems. The International Committee on Taxonomy of Viruses (ICTV) has described viruses as mobile genetic elements that encode at least one essential protein to encapsulate their nucleic acid and require a host to replicate. Also, viruses are the most abundant and genetically diverse acellular entities, which is closely related to the abundance and diversity of their hosts. As a result, viruses are one of the leading causes of ocean mortality, killing 20% of the marine biomass daily through 10^{23} viral infections per second, meaning that 25% of the ocean's carbon flows through viral drift, making them essential for our ecosystems. Despite their bad reputation, viruses contribute to the control and balance of aquatic ecosystems by regulating the size of their host populations and "forcing" them to coexist in equilibrium, facilitating to ecosystem resilience. Finally, although significant progress has been made in understanding the complexity and diversity of viruses, much of the "dark viral matter" remains to be discovered.

Keywords

Virus, host, marine ecosystem, prokaryote, abundance, diversity.

¿Qué son los virus y cómo se clasifican taxonómicamente?

De acuerdo con el Comité Internacional de Taxonomía de Virus (International Committee on Taxonomy of Viruses, ICTV), los virus son un tipo de elementos genéticos móviles (EGM) que codifican al menos una proteína que es un componente principal del virión y que sirve para encapsular su ácido nucleico, sea ADN o ARN (ver Figura 1) (ICTV, 2023). Los virus se conocen como *parásitos intracelulares obligados* porque necesitan una célula hospedera para replicarse. Además, son los "entes" biológicos acelulares con mayor diversidad genética y su inmensa abundancia está ligada a la de sus hospederos (Moelling y Broecker, 2019; Wigington *et al.*, 2016).

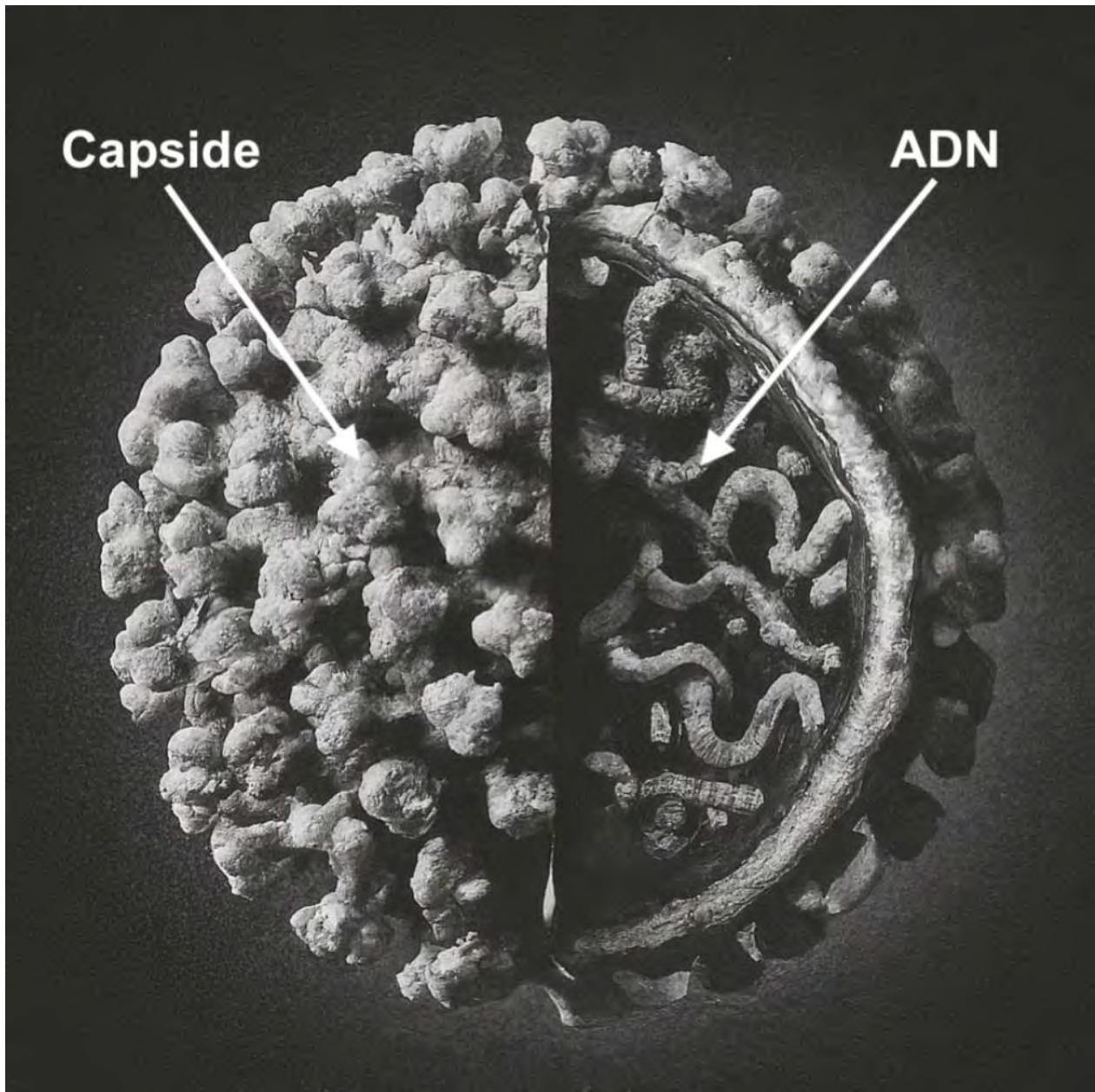


Figura 1. Representación esquemática de una partícula viral. Imagen generada por la inteligencia artificial AI test kitchen de Google (<https://aitestkitchen.withgoogle.com/tools/image-fx>).

Desde la antigüedad, los virus han llamado la atención y despertado interés para su estudio. En 1898, Martinus Willem Beijerinck utilizó por primera vez el término “*contagium vivum fluidum*” (del latín, “liquido vivo contagioso”) para describir el virus del mosaico del tabaco. Ese mismo año, Friedrich Loeffler y Paul Frosch descubrieron las partículas virales, y en 1915 Frederick Twort y Felix d'Herelle descubrieron los bacteriófagos, virus que infectan bacterias. Más tarde en 1938, Bodo von Borries, Helmut Ruska y Ernst Ruska publicaron las primeras imágenes de partículas virales (Burrell *et al.*, 2017; Kuhn, 2021). Estos avances obligaron a promover el desarrollo de la taxonomía viral.



El ICTV, es el organismo encargado de llevar a cabo la clasificación taxonómica de los virus utilizando, como se hace en biología, un sistema binomial que va de lo genérico a lo específico y que agrupa o clasifica a los virus en categorías llamados taxones. Esta clasificación, si bien se ha basado en la comparación de diversos caracteres virales que incluyen la composición de su genoma, la estructura de la cápside, la presencia de envoltura, el programa de expresión génica para producir proteínas virales, la diversidad de sus hospederos y su patogenicidad, la similitud de secuencias, ya sean de ácidos nucleicos y/o aminoácidos, son los caracteres más importantes para determinar sus relaciones evolutivas y así definir y distinguir grupos de virus (ICTV, 2023; Siddell *et al.*, 2023).

Al incrementarse el conocimiento relativo a los virus, queda claro que su enorme abundancia puede organizarse en un número reducido de linajes o grupos en los que comparten algunas características estructurales y genéticas básicas. Si bien, estos grupos se pueden considerar monofiléticos (evolucionan a partir de un ancestro en común), debe quedar muy claro que, a diferencia de la vida celular que se originó de un ancestro común, los virus no se originaron a partir de un evento único, sino que aparecieron en múltiples ocasiones independientemente y, al no tener un ancestro común único, se les considera polifiléticos. Así, los diversos tipos de virus se pueden agrupar utilizando algunos genes característicos (~20) que codifican proteínas claves para su replicación y formación de viriones (Koonin *et al.*, 2021a). De esta forma, con el descubrimiento de nuevos virus y con altas tasas de mutación que les permiten evolucionar rápidamente, los criterios para clasificar a los virus se modifican continuamente (Kuhn, 2021). Actualmente, con el desarrollo de nuevas herramientas moleculares, como la metagenómica y metatranscriptómica, se pueden estudiar todos los microorganismos, incluidos los virus, en una muestra a partir del material genético formado por ADN y ARN. De esta manera, se ha identificado una gran diversidad viral, sin embargo, en algunos casos, ubicarlos en algún grupo taxonómico ha resultado una tarea casi imposible de realizar ya que poseen secuencias de nucleótidos muy especiales que no se encuentran en otros virus u organismos. Estas secuencias desconocidas han sido denominadas *materia oscura viral* (Krishnamurthy y Wang, 2017).

La inmensidad del mundo viral: ¿Cuántos virus existen?

Los primeros estudios sobre la abundancia viral en los océanos estimaban una concentración de 10^4 partículas virales por mililitro de agua (Torrella y Morita, 1979). Sin embargo, este número era erróneo y en realidad el número de partículas virales en ecosistemas acuáticos podría alcanzar $\sim 10^7$ por mL de agua (Fig. 2) (Noble y Fuhrman, 1998). Con el propósito de mejorar la precisión en la cuantificación de la abundancia viral, se implementó el uso de citometría de flujo utilizando

fluoróforos (SYBR Green I, SYBR Gold, TOTO-1, SYTO, Styryl-TO) y así determinar el número de partículas virales. Este compuesto se incorpora al ADN o ARN, dependiendo del fluoróforo que se utilice, y al ser expuesto a luz UV se excita y genera una luz fluorescente. Esto permite observar y separar grupos de virus según su tamaño (Marie *et al.*, 1999; Zamora y Aguilar, 2018). Lo anterior es respaldado por pruebas que describen una gran abundancia viral, aproximadamente 3 órdenes de magnitud mayor que la de su competidor más cercano en número, las bacterias (Wei y Xu, 2020; Wigington *et al.*, 2016), aunque, en general, se considera que la abundancia viral es un orden de magnitud mayor que el de las bacterias, es decir, si en una muestra de agua marina existen un millón de bacterias (10^6), el número de virus deberá ser de diez millones (10^7) (Cael *et al.*, 2018). Además, es importante mencionar que nuevas disciplinas como la metagenómica y metatranscriptómica, también permiten determinar la abundancia viral mediante la cuantificación de las secuencias virales (Marx, 2022).

Es importante tener en cuenta que la relación virus-hospedero no es estática y debe determinarse para cada análisis espaciotemporal (Wigington *et al.*, 2016). Además, la abundancia viral varía dependiendo de los distintos ambientes acuáticos (mares, ríos, pantanos, arroyos, océanos, lagos, lagunas y costas) lo cual es un reflejo del número de infecciones virales, un factor importante en el control ecológico de los microorganismos (Bergh *et al.*, 1989).

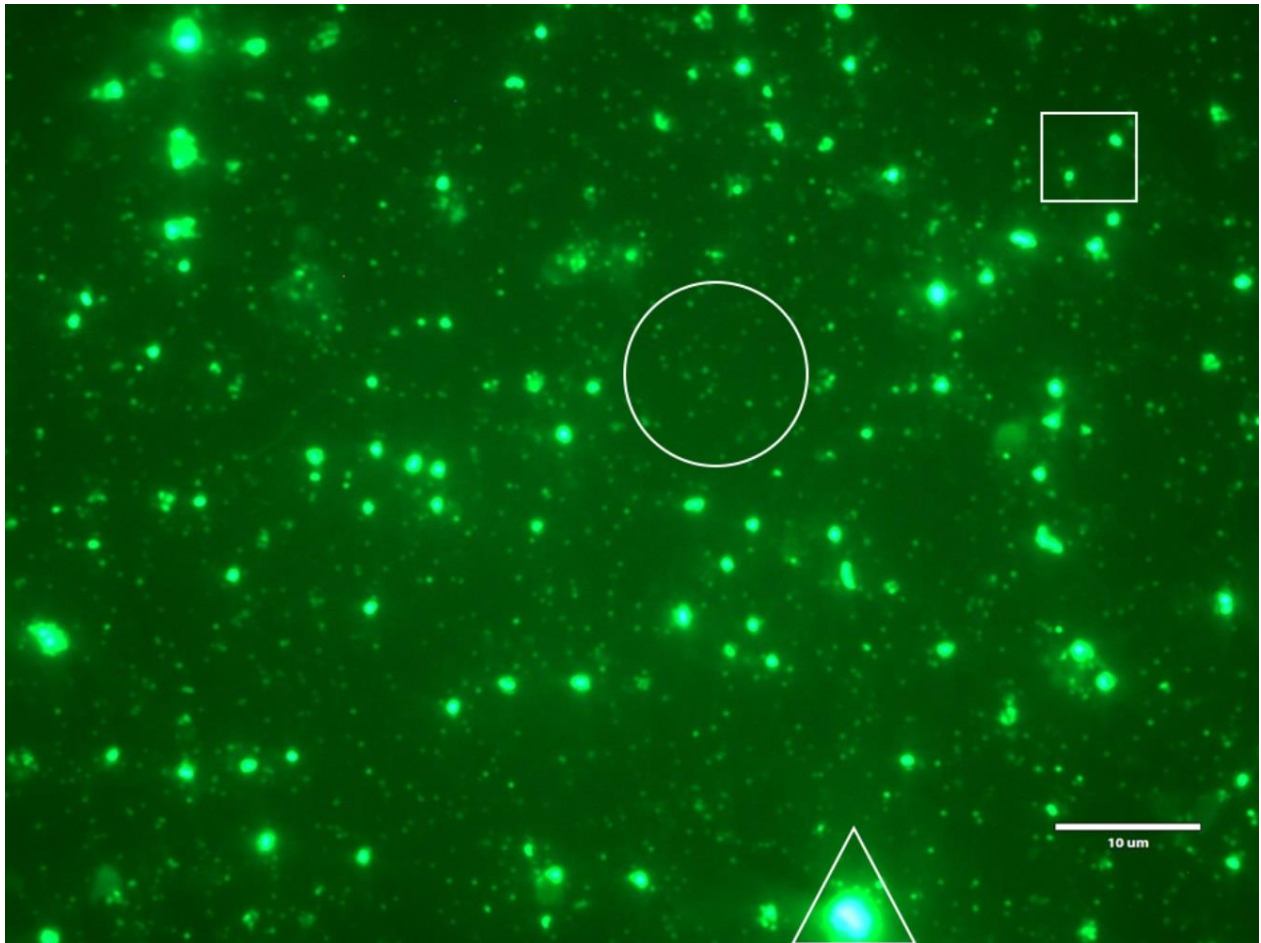


Figura 2. Imagen de partículas tipo virales y procariotas en filtro Anodisco Al_2O_3 de $0.02\ \mu\text{m}$ (Whatman) teñido con Sybr Gold. En el círculo se observan las partículas de tipo viral, en el cuadro se observan partículas tipo procariotas y en el triángulo se observan protistas.

Alta abundancia viral en el universo observable de los ecosistemas

En nuestro planeta habitan aproximadamente $\sim 10^{31}$ partículas virales, lo que supera la cantidad de estrellas en el universo visible (Mokili *et al.*, 2012; Musheigian, 2020; Suttle, 2007). Entonces, considerando esta información, surge una pregunta: ¿un ecosistema con alta abundancia viral puede considerarse saludable? Antes de responder, es importante mencionar que existe evidencia que destaca la importancia de las comunidades virales en los ecosistemas marinos, interviniendo en los ciclos biogeoquímicos, en la estructura de las comunidades, transferencia de genes, y evolución de organismos acuáticos (Jacquet *et al.*, 2010).

Los virus son una de las principales causas de mortalidad en los océanos, matando diariamente el 20% de la biomasa marina mediante 10^{23} infecciones virales por segundo. Por lo tanto, cada

infección lítica¹ genera nuevos virus y desechos celulares, formados por materia orgánica disuelta y particulada, que es asimilada por microorganismos o es exportada a las profundidades del océano (Fuhrman, 1999; Jover *et al.*, 2014), esto a través de la deriva viral, que es el movimiento de nutrientes mediado por los virus desde los organismos lisados hasta los depósitos de materia orgánica disuelta (Suttle, 2007). En consecuencia, el 25% del carbono en los océanos, fluye a través de la deriva viral, incluyendo el carbono de los nuevos virus y el que se libera durante la lisis celular, sin contar el nitrógeno y fósforo orgánico de los ácidos nucleicos y aminoácidos (Wilhelm y Suttle, 1999), convirtiendo así a los virus en componentes esenciales para el mantenimiento de las comunidades microbianas y el funcionamiento de los ecosistemas (Wang *et al.*, 2022).

Los virus son elementos esenciales de los ecosistemas, aunque suelen ser dejados de lado ya que los opacan sus efectos negativos. Sin embargo, algunos virus son mutualistas beneficiando a sus hospederos que incluyen bacterias, hongos, plantas, humanos, etc. (Gao *et al.*, 2022; Pradeu, 2016). Por ejemplo, cada humano es un ecosistema completo que alberga un estimado de 10^{13} células, $\sim 10^{14}$ bacterias y, entre diez a cien veces más virus (10^9 virus/g de intestino, 10^8 virus/mL de fluidos, 10^5 en sangre y 10^6 virus/cm² de piel). Evidentemente, en nuestro cuerpo habitan una gran cantidad de virus que, al infectar algunas bacterias y otros parásitos, nos protegen de lo extraño, manteniéndonos sanos, debido a que, la mayor parte del viroma de un humano sano consiste en bacteriófagos. La presencia de una gran cantidad de virus no implica necesariamente una enfermedad (Johansen *et al.*, 2023; Koonin *et al.*, 2021b; Moelling, 2016; Shanahan *et al.*, 2021; Zárate *et al.*, 2017). Por lo tanto, cada humano es un ecosistema completo con una alta abundancia de virus, lo que no implica algún problema de salud.

Los virus universalmente son considerados “entes” malos que causan enfermedades y muerte, sin embargo, los virus son mejores que su reputación (Moelling, 2016; Sankaran y Weiss, 2021). No obstante, como se ha mencionado desde una perspectiva ecológica, los virus son componentes cruciales de los ecosistemas, interactuando con otros elementos bióticos y abióticos en un espacio y tiempo continuo, las cuales afectan la diversidad, distribución y dinámica de los sistemas biológicos (Raman, 2006; Sommers *et al.*, 2021). Asimismo, hoy en día, se considera que en un ecosistema saludable existe mortalidad consecuencia de las innumerables infecciones que ocurren en él, lo que no necesariamente indica un ecosistema perturbado, además, un ecosistema saludable debe ser rico en parásitos, como los virus, parásitos intracelulares obligados que

¹ Los virus tienen dos estrategias principales de replicación: *el ciclo lítico*, en el que los virus se replican y lisan (o “rompen”) a sus hospederos, y *el ciclo lisogénico*, en la que los virus pueden integrar su genoma en el del hospedero, permaneciendo ahí latentes (Erez *et al.*, 2017).



requieren de células hospederas para realizar su replicación viral (French y Holmes, 2020; Hudson *et al.*, 2006; Wigington *et al.*, 2016), por lo tanto, bajo ciertas condiciones, un ecosistema con alta abundancia viral sí puede considerarse saludable.

El impacto de los virus en los ecosistemas marinos

En los ecosistemas marinos existe una alta abundancia viral, con algunos grupos que destacan debido a que son muy numerosos. Hoy se estima que los pelagífagos, por ejemplo, son los virus más abundantes conocidos. Estos virus (como el SAR11) infectan a bacterias marinas del género *Pelagibacter*, mismas que son consideradas las más abundantes y ubicuas de los océanos (Hwang *et al.*, 2017; Tucker *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2013). También, hay virus ubicuos como los del orden *Caudovirales*, que están presentes en ambientes con condiciones extremas (donde predominan temperaturas muy bajas o muy altas, o donde no hay agua, o en medios muy ácidos) donde suelen infectar a un gran rango de hospederos bacterianos adaptados a habitar estos ambientes (Dávila-Ramos *et al.*, 2019). Aunque en áreas marinas con bajo oxígeno la abundancia viral disminuye, la frecuencia de células infectadas puede ser similar a la observada en la superficie del océano, lo que ayuda a mantener estables las comunidades microbianas y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos (Jurgensen *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022), lo que implica que la diversidad y la abundancia viral depende principalmente de los hospederos presentes.

La superficie de los océanos y las zonas costeras son las áreas con mayor abundancia viral (Suttle, 2007). Esta abundancia disminuye al cambiar de aguas productivas costeras a aguas superficiales oligotróficas, que son cuerpos de agua con pocos nutrientes. Por lo tanto, la abundancia viral aumenta con la productividad de los cuerpos de agua, siendo los ecosistemas altamente eutróficos los que tienen mayor porcentaje de células infectadas (Danovaro *et al.*, 2011). Este proceso resulta en un control y equilibrio de los ecosistemas acuáticos mediante mecanismos como el de “*matar al ganador*” (Thingstad, 2000). En este modelo, poblaciones de diferentes bacterias conviven en un mismo hábitat. Bajo ciertas condiciones, alguna de dichas poblaciones (*la ganadora*) se ve favorecida y su número empieza a incrementarse, mientras que las poblaciones restantes (*las perdedoras*) se ven afectadas debido a que los recursos disponibles son consumidos mayoritariamente por la población de bacterias ganadora. Conforme los ganadores son más abundantes, su contacto con algunos virus se incrementa, haciéndolos más susceptibles a infecciones y, por supuesto, a morir. Así, los virus regulan el tamaño de las poblaciones y “obligan” a que coexistan en equilibrio. De igual forma, los virus son los encargados de regular las comunidades de microalgas contribuyendo a la reducción de la abundancia de las floraciones

algales de algunas especies (Rhodes *et al.*, 2008; Van Etten *et al.*, 2019). Algunas de estas floraciones pueden ser causadas por actividades humanas que aumentan la concentración de nutrientes y provocan una proliferación masiva de algas, lo que puede generar problemas económicos, ecológicos y de salud (Diersing, 2009; Wurtsbaugh *et al.*, 2019). Aunque los ecosistemas se ven afectados cuando suceden estos casos, los virus ayudan a controlar los microorganismos y restablecer el equilibrio, contribuyendo a la resiliencia del ecosistema.

Abundancia y diversidad viral: Identificando los principales determinantes

En la actualidad se conoce que los bacteriófagos tienen una abundancia mayor que la de sus hospederos, el bacterioplancton (Eggleston y Hewson, 2016). Por lo tanto, la estructura y la cantidad de virus es influenciada por diversos factores ambientales, como la concentración de diversos nutrientes inorgánicos (como fosfatos, nitritos, o nitratos, por ejemplo), el estado metabólico del hospedero y el tiempo de duplicación de las comunidades de hospederos procariotas y eucariotas (biomasa autótrofa), en diferentes escalas temporales y espaciales (Middelboe y Brussaard, 2017; Vlok *et al.*, 2019a). Anteriormente se consideraba que la temperatura podría afectar directamente la diversidad y abundancia viral, esta idea se ha descartado debido a un número creciente de estudios que sugieren que los nutrientes son factores significativos para la diversidad viral junto con la productividad primaria (Dominguez-Huerta *et al.*, 2022). Sin embargo, esto no significa que la temperatura no pueda afectar indirectamente la diversidad y abundancia viral al influir en la distribución y abundancia de los hospederos (Demory *et al.*, 2021). Además, los niveles de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo pueden jugar un papel importante para la abundancia viral, debido a que son esenciales para la replicación al formar parte de la estequiometría de las partículas virales (proporción de los elementos químicos que componen a los virus) (Finke *et al.*, 2017). Por lo tanto, los factores como la abundancia bacteriana, el nitrato, la clorofila y la temperatura pueden influir en la variación de la abundancia viral, aunque estos pueden variar dependiendo del entorno y las condiciones ambientales (Brum *et al.*, 2015; Finke *et al.*, 2017).

Las mutaciones o cambios en la secuencia del ADN viral, también contribuyen en la abundancia y diversidad viral. Un ejemplo de esto, son los virus de ARN que tienden a presentar tasas de mutaciones más altas que los virus de ADN, con alrededor de 10^{-4} substituciones por nucleótido por ciclo de replicación, provocando que exista una gran variabilidad genética, ampliando la gama de hospederos virales, aumentando su virulencia, la evasión de inmunidad del hospedero y la resistencia a antivirales (Simon-Loriere y Holmes, 2011; Vlok *et al.*, 2019b). Con todo esto, se asume que las comunidades virales de ARN pueden ser más diversas y complejas y están más involucradas



en procesos biogeoquímicos en los ecosistemas marinos de lo que se piensa (Kolundžija *et al.*, 2022). Además, aún se desconoce la verdadera abundancia de partículas virales de ARN, dejando mucha materia oscura viral por descubrir aun sobre este tipo de virus.

Otro factor poco estudiado es el cambio climático, el cual se cree que afecta la abundancia y la diversidad viral a nivel regional o global. Como es del conocimiento general, el cambio climático implica variaciones de temperatura globales que tienen grandes efectos en nuestro planeta. Así, por ejemplo, en los últimos años se han alcanzado los registros más elevados de temperatura, menores precipitaciones, así como tormentas o huracanes devastadores. Además, los océanos han absorbido entre el 28 y 34% del dióxido de carbono (CO₂) de las emisiones, provocando una disminución de aproximadamente 0.1 unidades de pH desde la era preindustrial, con una predicción de caída de 0.3 a 0.5 unidades en los próximos 80 años (Brierley y Kingsford, 2009; Sabine *et al.*, 2004). Estos cambios, afectan directamente el crecimiento, fisiología, distribución, reproducción, supervivencia, diversidad y evolución de los organismos marinos, que son hospederos virales.

Las condiciones climáticas pueden superar los límites de tolerancia normales de ciertos organismos, disminuyendo de esta forma la resistencia a infecciones (Roberts y Suttle, 2023). El aumento de la temperatura del mar favorecerá el crecimiento de organismos, como son los dinoflagelados nocivos tropicales y subtropicales como *Gambierdiscus*, *Fukuyoa* y *Ostreopsis*, incrementando sus densidades poblacionales y permitiéndoles migrar a hábitats más profundos o diferentes latitudes en busca de condiciones adecuadas para su reproducción (Tester *et al.*, 2020). También las microalgas se ven afectadas por cambios en la intensidad de la luz, acidificación de los océanos, estratificación del agua y la portación de nutrientes por precipitación (Gimenez, 2018). En resumen, el cambio climático puede alterar la distribución de los organismos marinos, facilitando así la dispersión de virus fuera de sus zonas endémicas debido a la relación con su hospedero y/o vectores (Brown *et al.*, 2022).

Virus Gigantes y Virófagos: Un Mundo Oculto

Los virus gigantes fueron descubiertos recientemente y han cambiado nuestra comprensión de los virus. Los primeros estudios fueron realizados mediante el cultivo de células de amebas (protozoos unicelulares) como *Acanthamoeba polyphaga*, y en 2003 se identificó el primer mimivirus, el cual fue llamado *Acanthamoeba polyphaga mimivirus* (APMV, por sus siglas en inglés), por su capacidad de infectar a la ameba *Acanthamoeba polyphaga* sp., e imitar a un microbio (Abrahão *et al.*, 2014), pero fue hasta el 2005 cuando se le clasificó como el fundador de la familia *Mimiviridae*. Estos virus

poseen una cápside de ~500 nm cubierta de fibras de 120-140 nm y un genoma de ADN de doble cadena (ADNs) de 1.2 Mb (1,200,000 pares de bases). Otros virus gigantes similares poseen cápsides de 370-600 nm y genomas de 1.02-1.26 Mb (Colson *et al.*, 2017). También en ecosistemas marinos se ha podido identificar diversos virus gigantes. En 2010 se aisló el virus *Cafeteria roenbergensis* (CroV) de un dinoflagelado, con una cápside de 300 nm y un genoma estimado de 730 kb (730,000 pares de bases) (Fischer *et al.*, 2010). Con el paso de los años, se han realizado nuevos descubrimientos de virus gigantes conocidos como virus nucleocitoplasmáticos de ADN de gran tamaño (NCLDV, por sus siglas en inglés) que pueden infectar desde algas hasta insectos y mamíferos (Bäckström *et al.*, 2019; Filée, 2013).

La diversidad de los NCLDV podría ser hasta 11 veces mayor de lo que se conocía y tiene una distribución a nivel global (Schulz *et al.*, 2020). Por ejemplo, de muestras de permafrost siberiano con más de 30,000 años pudieron identificar virus gigantes como *Pithovirus sibericum* (700 nm de diámetro y 1.25 Mb) y *Mollivirus sibericum* (600 nm de diámetro y 651 kb) (Legendre *et al.*, 2014, 2015). Los grupos dominantes de NCLDV varían significativamente según el sitio y profundidad en la fracción femto (<0.2µm), con *Phycodnaviridae* (29.7%) y *Asfarviridae* (19.9%), representando la mayor proporción, pero los taxones dominantes en todas ubicaciones y profundidades son *Mimiviridae* (64.6%) y *Phycodnaviridae* (25.4%) (Endo *et al.*, 2020; Moniruzzaman *et al.*, 2020).

Otro hallazgo importantísimo en la virología fue el descubrimiento de los virófagos, virus que infectan a otro virus. Estos tienen un genoma de ADNs con longitudes que oscilan entre 17 y 33 kb, codifican de 16 – 34 proteínas y pertenecen a la familia *Lavidaviridae* (Fischer, 2021). *Sputnik* fue el primer virógafo identificado, el cual presenta un genoma circular de ADNs de 18.3 kb y un tamaño de aproximadamente 50 nm, el cual se descubrió que está asociado a una cepa de APMV (La Scola *et al.*, 2008). Se cree que los virófagos tienen un mecanismo de secuestro de la maquinaria de transcripción y replicación de su virus hospedero para replicarse y expresar sus propios genomas, lo que requiere la co-infección de la célula huésped por un virus gigante. El descubrimiento de este tipo de virus es reciente y solamente se han podido identificar mediante metagenómica 14 especies y otras 10 por medio de co-cultivo, ampliando de esta manera nuestro conocimiento sobre la diversidad, evolución y complejidad de los virus (Mougari *et al.*, 2019).



Perspectivas y consideraciones

La clasificación viral actual está en constante evolución para poder adaptarse a la diversidad y abundancia de los virus descubiertos en las últimas décadas. Los investigadores para poder comprender mejor la diversidad y la abundancia viral, así como su papel en los ecosistemas, han recurrido a herramientas como la metagenómica, la cual ha revelado una enorme diversidad de virus en nuestros entornos, transformando totalmente nuestra comprensión de la virósfera (Sommers *et al.*, 2021).

Para poder entender cómo es que funciona la ecología viral, se deben de realizar estudios de la diversidad, abundancia y dinámica viral, este nuevo enfoque tiene implicaciones para la bioseguridad y puede ayudar a comprender mejor el papel de los virus en la red alimentaria de los ecosistemas (Alavandi y Poornima, 2012; Herath *et al.*, 2017). Junto con la metagenómica, resulta más fácil la detección rápida de virus emergentes y la identificación de sus reservorios naturales, lo que puede mejorar el control de enfermedades y prevenir la propagación de estas. Igualmente la metagenómica contribuirá a completar las secuencias virales en las bases de datos mejorando nuestra comprensión de la clasificación y evolución viral (Roux *et al.*, 2021; Sommers *et al.*, 2021).

Dada la complejidad y diversidad de los virus, el desarrollo de herramientas metagenómicas y análisis bioinformáticos es crucial para reconstruir genomas completos y realizar una identificación precisa de virus en muestras de distintos entornos (Roux *et al.*, 2021). En resumen, se puede decir que la abundancia viral aumenta conforme la productividad de los cuerpos de agua y aunque se ha avanzado significativamente en la comprensión de la ecología viral, aún queda mucha materia oscura viral, tanto de virus de ADN como de ARN por descubrir. Por lo tanto, sin importar el momento o el ecosistema que estemos examinando, siempre habrá nuevos descubrimientos por hacer en el campo de la virología.

Agradecimientos

Agradecemos enormemente la contribución proporcionada por el Ing. Juan Vega Peralta, Rosa María Valenzuela, Ing. Rodolfo Barraza, Alfredo Barreras Torres e Irma Soto del CIBNOR Hermosillo.

Referencias

- Abrahão, J.S., F.P. Dornas, L.C. Silva, G.M. Almeida, P.V. Boratto, P. Colson, ..., y E.G. Kroon. 2014. *Acanthamoeba polyphaga* mimivirus and other giant viruses: an open field to outstanding discoveries. *Virology Journal* (11): 1-12.
- Alavandi, S.V., y M. Poornima. 2012. Viral metagenomics: a tool for virus discovery and diversity in aquaculture. *Indian Journal of Virology* 23: 88–98.
- Bäckström, D., N. Yutin, S.L. Jørgensen, J. Dharamshi, F. Homa, K. Zaremba-Niedwiedzka, A. Spang, Y.I. Wolf, E.V Koonin y T.J.G. Ettema. 2019. Virus genomes from deep sea sediments expand the ocean megavirome and support independent origins of viral gigantism. *MBio* 10 (2): e02497-18.
- Bergh, Ø., K.Y. Børsheim, G. Bratbak y M. Heldal. 1989. High abundance of viruses found in aquatic environments. *Nature* 340 (6233): 467–468.
- Brierley, A.S., y M.J. Kingsford. 2009. Impacts of climate change on marine organisms and ecosystems. *Current biology* 19 (14): R602–R614.
- Brown, T.L., O.J. Charity y E.M. Adriaenssens. 2022. Ecological and functional roles of bacteriophages in contrasting environments: marine, terrestrial and human gut. *Current Opinion in Microbiology* 70: 102229.
- Brum, J.R., J.C. Ignacio-Espinoza, S. Roux, G. Doulcier, S.G. Acinas, A. Alberti, S. Chaffron, C. Cruaud, C. De Vargas y J.M. Gasol. 2015. Patterns and ecological drivers of ocean viral communities. *Science* 348 (6237).
- Burrell, C.J., C.R. Howard y F.A. Murphy. 2017. History and Impact of Virology. *Fenner and White's Medical Virology* 3–14.
- Cael, B.B., M.C.G. Carlson, C.L. Follett y M.J. Follows. 2018. Marine virus-like particles and microbes: a linear interpretation. *Frontiers in Microbiology* 9:358.
- Colson, P., B. La Scola, A. Levasseur, G. Caetano-Anollés y D. Raoult. 2017. Mimivirus: leading the way in the discovery of giant viruses of amoebae. *Nature Reviews Microbiology* 15 (4): 243–254.
- Danovaro, R., C. Corinaldesi, A. Dell'Anno, J.A. Fuhrman, J.J. Middelburg, R.T. Noble y C.A. Suttle. 2011. Marine viruses and global climate change. *FEMS microbiology reviews*, 35 (6): 993–1034.



- Dávila-Ramos, S., H.G. Castelán-Sánchez, L. Martínez-Ávila, M. del R. Sánchez-Carbente, R. Peralta, A. Hernández-Mendoza, A.D.W. Dobson, R.A. Gonzalez, N. Pastor y R.A. Batista-García. 2019. A review on viral metagenomics in extreme environments. *Frontiers in microbiology* 10: 2403.
- Demory, D., J.S. Weitz, A. Baudoux, S. Touzeau, N. Simon, S. Rabouille, A. Sciandra y O. Bernard. 2021. A thermal trade-off between viral production and degradation drives virus-phytoplankton population dynamics. *Ecology Letters* 24 (6): 1133–1144.
- Diersing, N. 2009. *Phytoplankton blooms: The basics*. Florida Keys National Marine Sanctuary pp.
- Dominguez-Huerta, G., A.A. Zayed, J.M. Wainaina, J. Guo, F. Tian, A.A. Pratama, B. Bolduc, M. Mohssen, O. Zablocki y E. Pelletier. 2022. Diversity and ecological footprint of Global Ocean RNA viruses. *Science* 376 (6598): 1202–1208.
- Eggleston, E.M., y I. Hewson. 2016. Abundance of two Pelagibacter ubiqui bacteriophage genotypes along a latitudinal transect in the north and south Atlantic Oceans. *Frontiers in microbiology* 7: 1534.
- Endo, H., R. Blanc-Mathieu, Y. Li, G. Salazar, N. Henry, K. Labadie, C. de Vargas, M.B. Sullivan, C. Bowler, P. Wincker, L. Karp-Boss, S. Sunagawa y H. Ogata. 2020. Biogeography of marine giant viruses reveals their interplay with eukaryotes and ecological functions. *Nature Ecology & Evolution* 4 (12): 1639–1649.
- Erez, Z., I. Steinberger-Levy, M. Shamir, S. Doron, A. Stokar-Avihail, Y. Peleg, S. Melamed, A. Leavitt, A. Savidor y S. Albeck. 2017. Communication between viruses guides lysis–lysogeny decisions. *Nature* 541 (7638): 488–493.
- Filée, J. 2013. Route of NCLDV evolution: the genomic accordion. *Current opinion in virology* 3 (5): 595–599.
- Finke, J.F., B.P.V. Hunt, C. Winter, E.C. Carmack y C.A. Suttle. 2017. Nutrients and other environmental factors influence virus abundances across oxic and hypoxic marine environments. *Viruses* 9 (6): 152.
- Fischer, M.G. 2021. The virophage family Lavidaviridae. *Current Issues in Molecular Biology* 40 (1): 1–24.
- Fischer, M.G., M.J. Allen, W.H. Wilson y C.A. Suttle. 2010. Giant virus with a remarkable complement of genes infects marine zooplankton. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (45): 19508–19513.

- French, R.K., y E.C. Holmes. 2020. An ecosystems perspective on virus evolution and emergence. *Trends in microbiology* 28 (3): 165–175.
- Fuhrman, J.A. 1999. Marine viruses and their biogeochemical and ecological effects. *Nature* 399 (6736): 541–548.
- Gao, Y., Y. Lu, J.A.J. Dungait, J. Liu, S. Lin, J. Jia y G. Yu. 2022. The “regulator” function of viruses on ecosystem carbon cycling in the Anthropocene. *Frontiers in Public Health* 10: 858615.
- Gimenez, P. 2018. Climate conditions, and changes, affect microalgae communities... should we worry? *Integrated Environmental Assessment and Management (IEAM)*, 14 (2): 181–184.
- Herath, D., D. Jayasundara, D. Ackland, I. Saeed, S.L. Tang y S. Halgamuge. 2017. Assessing species diversity using metavirome data: methods and challenges. *Computational and Structural Biotechnology Journal* 15: 447–455.
- Hudson, P.J., A.P. Dobson y K.D. Lafferty. 2006. Is a healthy ecosystem one that is rich in parasites? *Trends in Ecology & Evolution* 21 (7): 381–385.
- Hwang, J., S.Y. Park, M. Park, S. Lee y T.K. Lee. 2017. Seasonal dynamics and metagenomic characterization of marine viruses in Goseong Bay, Korea. *PloS one* 12 (1): e0169841.
- International Committee on Taxonomy of Viruses (ICTV). 2023. Virus Taxonomic Classification. En: <https://ictv.global/taxonomy/>.
- Jacquet, S., T. Miki, R. Noble, P. Peduzzi y S. Wilhelm. 2010. Viruses in aquatic ecosystems: important advancements of the last 20 years and prospects for the future in the field of microbial oceanography and limnology. *Advances in Oceanography and Limnology* 1 (1): 97–141.
- Jover, L.F., T.C. Effler, A. Buchan, S.W. Wilhelm y J.S. Weitz. 2014. The elemental composition of virus particles: implications for marine biogeochemical cycles. *Nature Reviews Microbiology* 12 (7): 519–528.
- Jurgensen, S.K., S. Roux, S.M. Schwenck, F.J. Stewart, M.B. Sullivan y J.R. Brum. 2022. Viral community analysis in a marine oxygen minimum zone indicates increased potential for viral manipulation of microbial physiological state. *The ISME journal* 16 (4): 972–982.
- Kolundžija, S., D.Q. Cheng y F.M. Lauro. 2022. RNA viruses in aquatic ecosystems through the lens of ecological genomics and transcriptomics. *Viruses* 14 (4): 702.



- Koonin, E.V, M. Krupovic y V.I. Agol. 2021a. The Baltimore classification of viruses 50 years later: How does it stand in the light of virus evolution?. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 85 (3): e00053-21.
- Koonin, E.V, V.V. Dolja y M. Krupovic. 2021b. The healthy human virome: From virus–host symbiosis to disease. *Current opinion in virology* 47: 86–94.
- Krishnamurthy, S.R., y D. Wang. 2017. Origins and challenges of viral dark matter. *Virus research* 239: 136–142.
- Kuhn, J.H. 2021. Virus Taxonomy. *Encyclopedia of Virology* 28–37. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.21231-4>.
- La Scola, B., C. Desnues, I. Pagnier, C. Robert, L. Barrassi, G. Fournous, M. Merchat, M. Suzan-Monti, P. Forterre, E. Koonin y D. Raoult. 2008. The virophage as a unique parasite of the giant mimivirus. *Nature* 455 (7209): 100–104. <https://doi.org/10.1038/nature07218>.
- Legendre, M., J. Bartoli, L. Shmakova, S. Jeudy, K. Labadie, A. Adrait, M. Lescot, O. Poirot, L. Bertaux y C. Bruley. 2014. Thirty-thousand-year-old distant relative of giant icosahedral DNA viruses with a pandoravirus morphology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (11): 4274–4279.
- Legendre, M., A. Lartigue, L. Bertaux, S. Jeudy, J. Bartoli, M. Lescot, J.M. Alempic, C. Ramus, C. Bruley, K. Labadie, L. Shmakova, E. Rivkina, Y. Couté, C. Abergel y J.M. Claverie. 2015. In-depth study of Mollivirus sibericum, a new 30,000-y-old giant virus infecting Acanthamoeba. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112 (38): E5327–E5335. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510795112>.
- Marie, D., C.P.D. Brussaard, R. Thyrhaug, G. Bratbak y D. Vaulot. 1999. Enumeration of marine viruses in culture and natural samples by flow cytometry. *Applied and Environmental Microbiology* 65 (1): 45–52.
- Martínez-Porchas, M., y F. Vargas-Albores. 2017. Microbial metagenomics in aquaculture: a potential tool for a deeper insight into the activity. *Reviews in Aquaculture* 9 (1): 42–56.
- Middelboe, M., y C.P.D. Brussaard. 2017. Marine viruses: key players in marine ecosystems. *Viruses* 9 (10): 302.
- Marx, V. 2022. Why the ocean virome matters. *Nature Methods* 19 (8): 924-927.
- Moelling, K. 2016. *Viruses: More friends than foes*. World Scientific pp.

- Moelling, K., y F. Broecker. 2019. Viruses and evolution – Viruses first? A personal perspective. *Frontiers in Microbiology* 10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00523>.
- Mokili, J.L., F. Rohwer y B.E. Dutilh. 2012. Metagenomics and future perspectives in virus discovery. *Current opinion in virology* 2 (1): 63–77.
- Moniruzzaman, M., C.A. Martinez-Gutierrez, A.R. Weinheimer y F.O. Aylward. 2020. Dynamic genome evolution and complex virocell metabolism of globally-distributed giant viruses. *Nature Communications* 11 (1): 1710. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15507-2>.
- Mougari, S., D. Sahmi-Bounsiar, A. Levasseur, P. Colson y B. La Scola. 2019. Virophages of giant viruses: an update at eleven. *Viruses* 11 (8): 733.
- Noble, R.T., y J.A. Fuhrman. 1998. Use of SYBR Green I for rapid epifluorescence counts of marine viruses and bacteria. *Aquatic Microbial Ecology* 14 (2): 113–118.
- Mushegian, A.R. 2020. Are there 10^{31} virus particles on earth, or more, or fewer?. *Journal of bacteriology* 202 (9): 10–1128.
- Pradeu, T. 2016. Mutualistic viruses and the heteronomy of life. *Studies in history and philosophy of science part C: Studies in history and philosophy of biological and biomedical Sciences* 59: 80–88.
- Raman, T.R.S. 2006. Restoration Ecology: The New Frontier. *Conservation and Society* 4 (3): 493-495.
- Rhodes, C.J., J.E. Truscott y A.P. Martin. 2008. Viral infection as a regulator of oceanic phytoplankton populations. *Journal of Marine Systems* 74 (1): 216–226. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.01.005>.
- Roberts, A.J., y C.A. Suttle. 2023. Pathogens and passengers: Roles for crustacean zooplankton viruses in the global ocean. *Microorganisms* 11 (4): 1054.
- Roux, S., J. Matthijssens y B.E. Dutilh. 2021. Metagenomics in virology. *Encyclopedia of Virology* 133.
- Sabine, C.L., R.A. Feely, N. Gruber, R.M. Key, K. Lee, J.L. Bullister, R. Wanninkhof, C.S.L. Wong, D.W.R. Wallace y B. Tilbrook. 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science* 305 (5682): 367–371.
- Sankaran, N., y R.A. Weiss. 2021. Viruses: Impact on Science and Society. *Encyclopedia of Virology*. 4th Edition, Oxford: Academic Press 1: 671–680.



- Schulz, F., S. Roux, D. Paez-Espino, S. Jungbluth, D.A. Walsh, V.J. Denef, K.D. McMahon, K.T. Konstantinidis, E.A. Elie-Fadrosh y N.C. Kyrpides. 2020. Giant virus diversity and host interactions through global metagenomics. *Nature* 578 (7795): 432–436.
- Siddell, S.G., D.B. Smith, E. Adriaenssens, P. Alfenas-Zerbini, B.E. Dutilh, M.L. Garcia, ..., y F.M. Zerbini. 2023. Virus taxonomy and the role of the International Committee on Taxonomy of Viruses (ICTV). *Journal of General Virology* 104 (5): 001840.
- Simon-Loriere, E., y E.C. Holmes. 2011. Why do RNA viruses recombine?. *Nature Reviews Microbiology* 9 (8): 617–626. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2614>.
- Sommers, P., A. Chatterjee, A. Varsani y G. Trubl. 2021. Integrating viral metagenomics into an ecological framework. *Annual review of virology* 8: 133–158.
- Suttle, C. A. 2007. Marine viruses—major players in the global ecosystem. *Nature Reviews Microbiology* 5 (10): 801–812.
- Tester, P.A., R.W. Litaker y E. Berdalet. 2020. Climate change and harmful benthic microalgae. *Harmful Algae* 91: 101655.
- Thingstad, T.F. 2000. Elements of a theory for the mechanisms controlling abundance, diversity, and biogeochemical role of lytic bacterial viruses in aquatic systems. *Limnology and Oceanography* 45 (6): 1320–1328.
- Torrella, F., y R.Y. Morita. 1979. Evidence by electron micrographs for a high incidence of bacteriophage particles in the waters of Yaquina Bay, Oregon: ecological and taxonomical implications. *Applied and Environmental Microbiology* 37 (4): 774–778.
- Tucker, S.J., K.C. Freil, E.A. Monaghan, C.E.S. Sullivan, O. Ramfelt, Y.M. Rii y M.S. Rappé. 2021. Spatial and temporal dynamics of SAR11 marine bacteria across a nearshore to offshore transect in the tropical Pacific Ocean. *PeerJ* 9: e12274–e12274. <https://doi.org/10.7717/peerj.12274>.
- Van Etten, J.L., I.V. Agarkova y D.D. Dunigan. 2019. Chloroviruses. *Viruses* 12 (1): 20. <https://doi.org/10.3390/v12010020>.
- Vlok, M., A.S. Lang y C.A. Suttle. 2019a. Application of a sequence-based taxonomic classification method to uncultured and unclassified marine single-stranded RNA viruses in the order Picornavirales. *Virus Evolution* 5 (2): vez056.
- Vlok, M., A.S. Lang y C.A. Suttle. 2019b. Marine RNA virus quasispecies are distributed throughout the oceans. *Mosphere* 4 (2): e00157-19.

- Wang, S., Y. Yang y J. Jing. 2022. A Synthesis of Viral Contribution to Marine Nitrogen Cycling. *Frontiers in Microbiology* 1452.
- Wei, M., y K. Xu. 2020. New insights into the virus-to-prokaryote ratio (VPR) in marine sediments. *Frontiers in Microbiology* 11: 1102.
- Wigington, C.H., D. Sonderegger, C.P.D. Brussaard, A. Buchan, J.F. Finke, J.A. Fuhrman, J.T. Lennon, M. Middelboe, C.A. Suttle, C. Stock, W.H. Wilson, K.E. Wommack, S.W. Wilhelm y J.S. Weitz. 2016. Re-examination of the relationship between marine virus and microbial cell abundances. *Nature Microbiology* 1 (3): 15024. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2015.24>.
- Wilhelm, S.W., y C.A. Suttle. 1999. Viruses and nutrient cycles in the sea: viruses play critical roles in the structure and function of aquatic food webs. *Bioscience* 49 (10): 781–788.
- Wurtsbaugh, W.A., H.W. Paerl y W.K. Dodds. 2019. Nutrients, eutrophication and harmful algal blooms along the freshwater to marine continuum. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 6 (5): e1373.
- Zamora, J.L.R., y H.C. Aguilar. 2018. Flow virometry as a tool to study viruses. *Methods* (134): 87–97.
- Zárate, S., B. Taboada, M. Yocupicio-Monroy y C.F. Arias. 2017. Human Virome. *Archives of Medical Research* 48 (8): 701–716. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2018.01.005>.
- Zhao, Y., B. Temperton, J.C. Thrash, M.S. Schwalbach, K.L. Vergin, Z.C. Landry, M. Ellisman, T. Deerinck, M.B. Sullivan y S.J. Giovannoni. 2013. Abundant SAR11 viruses in the ocean. *Nature* 494 (7437): 357–360.

Cita

Lee-Lara, N. E., Mendoza-Cano, F., Sánchez-Paz, A. y Encinas-García, T. 2025. Explorando el misterioso universo viral: La virósfera y su materia oscura. *Recursos Naturales y Sociedad*, 2025. Vol. 11 (1): 01-19. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0001>

Sometido: 12 de agosto de 2024

Aceptado: 16 de diciembre de 2024

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editor asociado: Dr. Eduardo Quiroz Guzmán

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

Essential elements for life, but only in the right amount

Elementos esenciales para la vida, pero solo en su justa medida

Dulce L. Ambriz Pérez¹, Carmen C. Osuna Martínez² y Magdalena E. Bergés Tiznado³

Resumen

Los elementos esenciales son de gran importancia biológica, ya que aún con concentraciones mínimas tienen funciones de gran relevancia en el organismo. Existen dosis diarias recomendadas para cumplir con los requerimientos necesarios de cada uno, sin embargo, un exceso de ellos puede dar lugar a efectos adversos en la salud, por lo que se han establecido valores de límites superiores de consumo diario. No obstante, pueden ocurrir intoxicaciones por ingesta de alimentos o agua contaminados, por inhalación o contacto cutáneo. En este artículo nos enfocamos en 4 elementos esenciales: zinc, cobre, cobalto y selenio; se lleva a cabo una descripción de estos, así como las principales fuentes de obtención para la salud humana, su función biológica y los efectos de las deficiencias y exposiciones a excesos de estos.

Palabras clave

Zinc, cobre, cobalto, cobalamina, vitamina B12, selenio.

¹ Ingeniería en Energía-Maestría en Ciencias Aplicadas, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México
Programa estancias Postdoctorales por México 2022, CONAHCYT-Facultad de Ciencias del Mar,
Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México

² Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, Paseo Claussen s/n, Mazatlán, Sinaloa, 82000, México

³ Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, México

* Autor de correspondencia: E-mail: carmen.cristina.osuna@uas.edu.mx



Abstract

Essential elements are of great biological importance, since at concentrations considered as minimum, they have highly relevant functions in the body. There are recommended daily doses to meet the necessary requirements of each essential element, however, an excess of them can lead to adverse effects on health, so upper limit values for daily consumption have been established, however, poisoning can occur by ingestion of contaminated food or water, by inhalation or skin contact. In this article we focus on 4 essential elements: zinc, copper, cobalt and selenium; a description of these is carried out, as well as the main sources of obtaining them for human consumption, their biological function and the effects of deficiencies and exposure to excesses of them.

Keywords

Zinc, copper, cobalt, cobalamin, vitamin B12, selenium.

Antecedentes

Los elementos esenciales están presentes en todos los tejidos y fluidos del cuerpo, aunque no aportan energía, su presencia es necesaria en múltiples procesos vitales, entre los más conocidos se encuentran el calcio y el hierro. Diversos estudios científicos han demostrado que es necesario incluir elementos esenciales en la dieta, ya que su deficiencia se ha asociado con enfermedades que reflejan la función de dicho elemento en el organismo, como se discutirá más adelante. Sin embargo, se requiere un estado de equilibrio en la ingesta de elementos esenciales, ya que se ha comprobado que estos mismos elementos pueden ser tóxicos para la vida, dependiendo de la dosis y tiempo de exposición (Soetan *et al.*, 2010).

En este escrito hablaremos de los elementos zinc (Zn), cobre (Cu), cobalto (Co) y selenio (Se), ya que su aportación a la nutrición humana es menos conocida por la población, aunque, tienen un papel importante en el funcionamiento adecuado del organismo. En la Figura 1 se observan las dosis de ingesta diaria recomendadas (IDR) de estos elementos esenciales para el humano, según los grupos de edad más importantes; en este sentido, se han reconocido a las mujeres embarazadas y a los niños como los grupos más vulnerables a sufrir deficiencias, principalmente en países en vías de desarrollo (Soetan *et al.*, 2010).



*La cobalamina también es conocida como vitamina B12, y en su composición tiene cobalto (Co). 1µg es la millonésima parte de 1 g.

Figura 1. Ingesta Diaria Recomendada (IDR) de zinc, cobre y cobalamina (vitamina B12). Fuente de los datos: Rosas-Romero & Covarrubias-Gómez (2020); Linus Pauling Institute (2024); NIH (2024).

Se pueden obtener las cantidades recomendadas de Zn, Cu, Co y Se mediante el consumo de una gran variedad de alimentos, en la Fig. 2 se observan algunos ejemplos. Pensemos que, en un día al tomar una taza de café descafeinado (aproximadamente 10 g de café) ingerimos 18 mg de Cu, con lo que se cubre la IDR para una persona adulta; mientras que si comemos 100 g de atún (aproximadamente 1 lata) ingerimos 80.4 µg de Se, con lo que se cubre la IDR para todos los grupos de edad.



*Un µg es la millonésima parte de 1 g.

Figura 2. Ejemplos de alimentos ricos en zinc, cobre, cobalto y selenio. Fuente de los datos: 1) CUN, 2024a, 2) Mataix, 2011, 3) Paustenbach *et al.*, 2013, 4) CUN, 2024b.

Así mismo, como medida de prevención se han establecido límites superiores diarios de consumo, que tienen en cuenta todas las fuentes, como alimentos, bebidas, suplementos y medicamento. En la Tabla 1 se presentan los límites superiores de Zn, Cu y Se según los principales grupos de edad. En el caso de Co, no se han establecido límites superiores de consumo debido a que la única fuente



alimenticia es la cianocobalamina (vitamina B12), la cual es soluble en agua y cuyo exceso se excreta mediante la orina (Zulfiqar *et al.*, 2019). Cabe mencionar que los límites superiores no se aplican a las personas que están tomando suplementos alimenticios por razones médicas y bajo las instrucciones de un médico.

Tabla 1. Límites superiores diarios de consumo de zinc, cobre y selenio. Fuente de los datos: NIH (2021, 2022a,b).

LÍMITE SUPERIOR MÁXIMO	ZINC	COBRE	SELENIO
HOMBRES, MUJERES Y MUJERES EN PERIODO DE CRIANZA*	40 mg/día	10 mg/día	400 µg/día
NIÑOS < 1 AÑO	4-5 mg/día	No establecido	45-60 µg/día
NIÑOS > 1 AÑO	7-23 mg/día	1-5 mg/día	90-280 µg/día

*Mujeres en periodo de crianza se refiere a mujeres embarazadas y durante la lactancia materna.
Un µg es la millonésima parte de 1 g.

Cabe mencionar que estos elementos pueden ingresar al cuerpo por diferentes vías, como la inhalación de aire con polvo de estos elementos, cuando la piel entra en contacto con materiales ricos en estos elementos, a través de la ingesta de agua contaminada o mediante la ingesta de alimentos, siendo esta última la fuente más común para la mayoría de la población (ASTDR, 2016a,b,c,d).

A continuación, discutiremos las características de los elementos esenciales Zn, Cu, Co y Se; así como sus funciones en el cuerpo humano, las principales fuentes de obtención y los efectos en la salud de exposiciones deficientes o excesivas de los mismos.

Zinc (Zn)

El Zn es un metal brillante de color blanco-azulado, se considera uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre (ATSDR, 2016a). En el organismo humano, el Zn es un componente estructural de las proteínas, por lo que influye en distintos procesos celulares relacionados con el metabolismo de proteínas y ADN. Además, el Zn está relacionado con algunas hormonas como las del timo, por lo que participa en procesos inmunitarios y de protección celular. La ingesta de Zn puede hacerse a través de la dieta, mediante el consumo de alimentos como hígado,

carnes rojas, aves de corral, pescado, camarones, ostras y cangrejos; aunque alimentos de origen vegetal como los cereales también contienen Zn, su biodisponibilidad es menor debido a la presencia de algunos compuestos como fitatos, fibra y lignina. En caso de pacientes que reciben nutrición enteral (vía digestiva) o parenteral (vía venosa) se recomienda el uso de suplementos de Zn para disminuir el riesgo de deficiencias (Rosas-Romero y Covarrubias-Gómez, 2020).

La mayoría de los casos de deficiencia de Zn no son detectados clínicamente, sin embargo, existe una enfermedad hereditaria llamada acrodermatitis enteropática que se caracteriza por un metabolismo deficiente de Zn, por lo que es considerada como un ejemplo de lo que sucede en un humano con deficiencia severa de este elemento. Esta condición, tiene manifestaciones clínicas como retraso del crecimiento, atrofia tímica, hipogonadismo, infertilidad, dermatitis, alopecia, malos resultados del embarazo, teratología, retraso en la curación de heridas, anorexia, diarrea y mayor susceptibilidad a enfermedades infecciosas causadas por bacterias, virus y hongos patógenos. Las poblaciones más vulnerables a sufrir deficiencias de Zn son niños lactantes y adolescentes, ya que son etapas de crecimiento rápido, por lo que las necesidades de Zn en ocasiones no pueden satisfacerse (de Romaña *et al.*, 2010; Rosas-Romero y Covarrubias-Gómez, 2020).

A pesar de que el Zn es el menos tóxico de todos los elementos esenciales, se han encontrado alteraciones en la salud humana asociadas al consumo de dosis mayores a las recomendadas durante periodos largos. Algunos de los efectos adversos asociados al exceso de Zn son alteraciones en los sistemas gastrointestinal, hematológico, respiratorio, cardiovascular y neurológico. Se ha demostrado que un exceso en el uso de suplementos alimenticios de Zn tiene efectos negativos, relacionándolo con un riesgo significativamente mayor de cáncer de próstata, así como la inhibición de los efectos beneficiosos de los biofosfonatos (medicamentos utilizados para el tratamiento de osteopenia y osteoporosis), el incremento de los niveles de testosterona, incremento de colesterol de lipoproteínas de baja densidad (LDL) (conocido como colesterol "malo"), reducción de los niveles de colesterol de lipoproteínas de alta densidad (HDL) (colesterol "bueno") y puede fomentar una disfunción inmune. Además, el exceso de Zn en el organismo puede interferir y disminuir el estatus corporal de Cu (Rosas-Romero y Covarrubias-Gómez, 2020; Rubio *et al.*, 2007).



Cobre (Cu)

El Cu es un metal rojizo que se encuentra de forma natural en las rocas (como mineral), el suelo, el agua, los sedimentos y el aire en bajos niveles, así como también forma parte de la estructura de organismos vivos (ATSDR, 2016b).

El Cu es el tercer metal esencial más importante biológicamente después del hierro y el zinc, entra al cuerpo humano a través de la piel, los alimentos y el agua. Las reservas de Cu en el cuerpo se encuentran en el hígado, ya que es necesario en procesos metabólicos del organismo a nivel celular y en los huesos, por ejemplo, es utilizado para la creación de hemoglobina (ATSDR, 2016b).

Sin embargo, deficiencia o excesos de la dosis diaria necesaria pueden presentar diversos problemas de salud en la población humana. La falta de Cu puede causar anemia, problemas de huesos y cardiovasculares, debilitando sistemas sensoriales. Existe la enfermedad de Menkes que causa una deficiencia de Cu, y los síntomas que se manifiestan son el rizado y caída del cabello, deterioro en el crecimiento y en el sistema nervioso; y, por el contrario, en la enfermedad de Wilson hay una acumulación en exceso de Cu que causa degeneración hepática, neurológica o psiquiátrica. Los casos de intoxicación aguda y crónica son extremadamente raros. Cuando hay exposición aguda al Cu a través de humos, alimento o agua puede causar irritación del sistema respiratorio y daños gastrointestinales, provocando náuseas, vómito y debilidad. Está documentado un caso de muerte de una mujer en Estados Unidos por intoxicación aguda porque ingirió 275 monedas de Cu. La exposición crónica a altos niveles de Cu puede provocar irritación gastrointestinal. Una enfermedad que ha afectado a niños menores de 4 años en la India por ingerir leche contaminada con Cu es la cirrosis infantil, ya que se acostumbraba a almacenar o hervir la leche en recipientes hechos de aleaciones de cobre, esto causaba gran acumulación de Cu en el hígado de los infantes y lo degeneraba rápidamente (Marquardt *et al.*, 1999).

Cobalto (Co)

El Co se encuentra naturalmente en pequeñas cantidades en la mayoría de las rocas, en el suelo, el agua, en plantas y en animales (ATSDR, 2016c). Biológicamente, el Co está involucrado en el metabolismo de proteínas y ADN, así como con el crecimiento y regulación celular. El Co es un componente de la vitamina B12 (cobalamina), representando aproximadamente 4% de su composición. La vitamina B12 es la única fuente alimenticia de Co para los humanos, está presente en alimentos de origen animal y fermentados, principalmente en vísceras como el hígado, seguido

de almejas, ostras, carne de res extra magra, mariscos, huevos, leche, yogurt, pollo y queso (Soetan y col., 2010). La vitamina B12 se requiere para la producción de los glóbulos rojos, por lo tanto, para mantener una buena salud (Paustenbach *et al.*, 2013).

Como se mencionó anteriormente, el exceso de Co por consumo de vitamina B12 es eliminado por la orina (Zulfiqar *et al.*, 2019). Sin embargo, existen casos reportados de exceso de Co en sangre, que están asociados con otros padecimientos o una ingesta inadecuada de suplementos alimenticios; por ejemplo, personas con implantes defectuosos de rodilla o cadera elaborados con aleaciones metálicas que contienen Co, por lo que se ha recomendado que una concentración de 100 µg/L de Co en sangre debe ser monitoreado, mientras 300 µg/L es considerada una concentración tóxica (Paustenbach *et al.*, 2013).

El Co se ha utilizado como tratamiento contra la anemia y como agente estimulante de glóbulos rojos para mujeres embarazadas, siempre bajo supervisión médica, ya que cuando las personas tienen exposición al Co de forma crónica se pueden generar serios efectos en la sangre, ya que se crea un exceso de glóbulos rojos que provoca que la sangre se espese, además, puede causar hipotiroidismo porque el Co hace que se disminuya la captación de yodo para la producción de hormonas tiroideas; se desarrollan cardiopatías, así como efectos neurológicos reversibles, por ejemplo, pérdida del oído y la visión (Paustenbach *et al.*, 2013).

Algunos casos reportados de intoxicación por Co incluyen trabajadores expuestos prolongadamente al aire con cobalto que proviene de la industria de las aleaciones, los principales síntomas que éstos pueden sufrir son dificultad para respirar, jadeos, asma, pulmonía y salpullido en la piel. En los años 60 del siglo pasado, en Canadá se reportó un caso de alta exposición al Co por el consumo de cerveza, ya que en esa época se utilizaban sales de Co como estabilizador de la espuma, lo que provocó que la población desarrollara náuseas, vómitos y finalmente problemas del corazón, ocasionando muertes (ATSDR, 2016c).

Existen pocos casos reportados de exposición al Co a través del agua, uno de ellos fue el de un niño de 19 meses de edad que ingirió 30 mL de cloruro de cobalto (CoCl_2) que le provocó necrosis en el estómago, edema cerebral y posterior muerte; también se reportó una intoxicación accidental por ingerir jugo contaminado, el jugo se contenía en una jarra de vidrio azul teñida con Co, afortunadamente el paciente fue tratado oportunamente (Paustenbach *et al.*, 2013).



Selenio (Se)

El Se es un elemento mineral, ampliamente distribuido en la naturaleza en la mayoría de las rocas y suelos, tiene apariencia entre gris-metálica a cristales negros. El Se generalmente no se encuentra en forma elemental, pero a menudo está combinado con otros elementos como cobre, azufre, plata, oxígeno, entre otros (ATSDR, 2016d).

El Se en el cuerpo humano forma parte de procesos de vital importancia, ya que protege la membrana celular de la acción negativa de radicales libres, por lo que se le considera un poderoso antioxidante. Igualmente, participa en el crecimiento celular, metabolismo de lípidos y producción de glóbulos blancos. Además, participa en la regulación de la síntesis y degradación de hormonas tiroideas (Torres Camacho y Chogar Oquendo, 2014). El Se es un nutriente esencial para la reproducción humana, el desarrollo y la función de la placenta, así como en el crecimiento y el desarrollo del sistema nervioso del feto. Debido a su poder antioxidante contribuye a reducir el daño oxidativo de espermatozoides y óvulos y participa también en la síntesis de la testosterona (González Rodríguez *et al.*, 2018).

El Se está presente en alimentos como cereales integrales, pan, mariscos, carnes, pescado, lácteos, brócoli, repollo, apio, cebolla y ajo. Una ingesta de Se menor a la recomendada puede dar lugar a una deficiencia, por ejemplo, la enfermedad de Keshan, una miocardiopatía infantil, y la enfermedad de Kaschin-Beck, una osteoartritis endémica en adolescentes y preadolescentes, ambas enfermedades relacionadas con una deficiencia severa de Se, ocurriendo en zonas rurales de China y Siberia Oriental, que se caracterizan por tener suelos pobres en Se (López-Bellido Garrido y López Bellido, 2013; Torres Camacho y Chogar Oquendo, 2014).

Por otro lado, la exposición a Se por encima de la IDR, puede presentar diferentes efectos dependiendo del tiempo de exposición, en una intoxicación aguda los signos característicos son náuseas y vómitos, diarrea, aliento a ajo, pérdida de pelo, alteraciones en las uñas, acidosis metabólica, irritabilidad, fatiga y neuropatía periférica (debilidad, entumecimiento y/o dolor en manos y pies). La intoxicación crónica por Se es conocida como selenosis y se caracteriza por la fragilidad y pérdida de pelo y uñas, afectación gastrointestinal, lesiones cutáneas, caída de los dientes y afectación del sistema nervioso. Existe evidencia científica para considerar que el exceso de Se tiene un efecto embriotóxico y teratogénico; lo que significa que es capaz de producir mal formaciones durante la gestación (Casals Mercadal *et al.*, 2005).

Conclusión

Los elementos Zn, Cu, Co y Se son esenciales para el correcto funcionamiento del metabolismo humano y el mantenimiento de la salud de este, ya que forman parte de procesos indispensables; y están relacionados con la regulación y funcionamiento de los distintos sistemas del cuerpo humano. Se pueden obtener mayormente mediante una dieta adecuada y balanceada, cumpliendo con la ingesta diaria recomendada (IDR) según los diferentes grupos de edad, sin exceder los límites superiores de consumo que ya han sido establecidos. El exceso de elementos esenciales en el organismo está relacionado con diversas alteraciones y/o efectos negativos a la salud.

Agradecimientos

La Dra. Ambriz-Pérez agradece al Programa de SECIHTI Estancias Posdoctorales por México, del que forma parte.

Referencias

- ATSDR. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. 2016a. Resúmenes de Salud Pública – Zinc (Zinc). En: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs60.html (consultado el 20/09/24).
- ATSDR. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. 2016b. Resúmenes de Salud Pública – Cobre. En: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs132.html (consultado el 20/09/24).
- ATSDR. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. 2016c. Resúmenes de Salud Pública – Cobalto. En: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs33.html (consultado el 20/09/24).
- ATSDR. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. 2016d. Resúmenes de Salud Pública – Selenio. En: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs92.html (consultado el 20/09/24).
- Casals Mercadal, G., Torra Santamaria, M., Deulofeu Piquet, R., y Ballesta Gimeno, A. M. 2005. Importancia del selenio en la práctica clínica. *Química Clínica*, 24(3), 141.
- CUN. Clínica Universidad de Navarra. 2024a. Alimentos ricos en zinc. En: <https://www.cun.es/chequeos-salud/vida-sana/nutricion/alimentos-ricos-zinc> (consultado el 20/09/24).



- el 15/11/24).
- CUN. Clínica Universidad de Navarra. 2024b. Alimentos ricos en selenio. En: <https://www.cun.es/chequeos-salud/vida-sana/nutricion/alimentos-ricos-selenio> (consultado el 15/11/24).
- de Romaña, D. L., Carlos Castillo, D., y Diazgranados, D. 2010. El zinc en la salud humana-II. *Revista Chilena de Nutrición*, 37(2), 240–247.
- González Rodríguez, L. G., López Sobaler, A. M., Perea Sánchez, J. M., Ortega, R. M., González Rodríguez, L. G., López Sobaler, A. M., Perea Sánchez, J. M., y Ortega, R. M. 2018. Nutrición y fertilidad. *Nutrición Hospitalaria*, 35(SPE6), 7–10.
- Linus Pauling Institute. 2024. Cobre. Oregon State University. En: <https://lpi.oregonstate.edu/es/mic/minerales/cobre> (consultado el 20/09/24).
- López-Bellido Garrido, F. J., y López Bellido, L. 2013. Selenio y salud: valores de referencia y situación actual de la población española. *Nutrición Hospitalaria*, 28(5), 1396–1406.
- Marquardt H., Schäfer S., McClellan R.O., & Welsh F. 1999 *Toxicology*. Academic Press, EEUU., pp 755 – 804.
- Mataix Verdú FJ. Tabla de composición de alimentos. 5ª ed. Granada: Editorial Universidad de Granada; 2011. ISBN-13: 9788433849809.
- NIH. National Institutes of Health. 2021. Selenium. En: <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Selenium-Consumer/> (consultado el 21/09/24).
- NIH. National Institutes of Health. 2022a. Cobre. En: <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Copper-DatosEnEspanol/> (consultado el 21/09/24).
- NIH. National Institutes of Health. 2022b. Zinc. En: <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Zinc-DatosEnEspanol/> (consultado el 21/09/24).
- NIH. National Institutes of Health. 2024. Vitamina B12 - Datos en español. En: <https://ods.od.nih.gov/factsheets/VitaminB12-DatosEnEspanol/>
- Paustenbach D.J., Tvermoes B.E., Unice K.M., Finley B.L., & Kerger B.D. 2013. A review of the health hazards posed by cobalt. *Critical Reviews in Toxicology* 43: 316 – 362.
- Rosas-Romero, R., y Covarrubias-Gómez, A. 2020. El papel del zinc en la salud humana. *Revista Médica Del Instituto Mexicano Del Seguro Social*, 477–485. En: <https://doi.org/10.24875/RMIMSS.M20000073> (consultado el 21/09/24).
- Rubio, C., González, D., Martín-Izquierdo, R. E., Revert, C., Rodríguez, I., y Hardisson, A. 2007. Alimentos funcionales El zinc: oligoelemento esencial. *Nutrición Hospitalaria*, 22, 101–107.

Soetan, K.O., Olaiya, C.O., & Oyewole, O.E. 2010. The importance of mineral elements for humans, domestic animals and plants: A review. *African Journal of Food Science*, 4, 200-222.

Torres Camacho, V., y Chogar Oquendo, D. 2014. Magnesio - selenio. *Revista de Actualización Clínica Investiga*, 41, 2156-2159.

Zulfiqar, A.-A., Andres, E., y Villalba, N. L. 2019. Hipervitaminosis B12. Nuestra experiencia y una revisión. *Medicina*. Buenos Aires, 79, 391-396.

Cita

Ambriz Pérez D.L., C.C. Osuna Martínez y M.E. Bergés Tiznado. Elementos esenciales para la vida, pero solo en su justa medida. *Recursos Naturales y Sociedad*, 2025. Vol. 11 (1): 21-31. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0002>

Sometido: 25 de septiembre de 2024

Aceptado: 3 de diciembre de 2025

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editor asociado: Dr. Vladimir Juárez Arellano

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

Uses of tejocote (*Crataegus mexicana*) in Mexico from pre-hispanic times to the present: Relevance of its medicinal uses and pharmacological development potential

Usos del tejocote (*Crataegus mexicana*) en México desde la época prehispánica hasta la actualidad: Relevancia de sus usos medicinales y su potencial desarrollo farmacológico

Maira Huerta-Reyes^{1*} y Santiago Xolalpa-Molina²

Resumen

El tejocote es un árbol nativo de México que desde la época prehispánica se utiliza como alimento. Hasta el momento, también se han reportado usos medicinales, para la construcción, como forraje, ornamental, hortícola e industrial, pero se le sigue considerando como una planta subutilizada o desaprovechada. Los usos medicinales del tejocote en la Medicina Tradicional Mexicana revelan que se ha utilizado para el tratamiento de enfermedades respiratorias y diabetes, las cuales afectan de manera importante a la población mexicana.

La presente divulgación pretende dar a conocer la información más actualizada acerca de los usos del tejocote en la Medicina Tradicional Mexicana, así como la información referente a los avances científicos para que en un futuro próximo se pueda elaborar un medicamento con base en el tejocote. Dicho medicamento podría resultar útil en el tratamiento de enfermedades relevantes para la población mexicana, a partir de un recurso natural propio.

Palabras clave

Tejocote, *Crataegus mexicana*, enfermedades respiratorias, diabetes mellitus, Medicina Tradicional Mexicana.

1 Unidad de Investigación Médica en Enfermedades Nefrológicas, Hospital de Especialidades “Dr. Bernardo Sepúlveda Gutiérrez”, Centro Médico Nacional Siglo XXI, Instituto Mexicano del Seguro Social, Av. Cuauhtémoc #330, Cuauhtémoc, Ciudad de México 06720, México.

2 Herbario Medicinal, Centro Médico Nacional Siglo XXI, Instituto Mexicano del Seguro Social, Av. Cuauhtémoc #330, Cuauhtémoc, Ciudad de México 06720, México.

* Autor de correspondencia: E-mail: chilanguisima@yahoo.com



Abstract

The tejocote is a tree native to Mexico that has been used as food since pre-Hispanic times. So far, medicinal, construction, forage, ornamental, horticultural, and industrial uses have also been reported, but it is still considered an underutilized plant. The medicinal uses of tejocote in Traditional Mexican Medicine reveal that it has been used for the treatment of respiratory diseases and diabetes, which significantly affect the Mexican population. In this way, this dissemination aims to make known to the general population the most up-to-date information about the medicinal uses of tejocote in Traditional Mexican Medicine, as well as to transmit information regarding scientific advances that in the near future could lay the necessary basis for the development of a medicine from tejocote that could be useful in the treatment of diseases that affect the Mexican population, using its own natural resource.

Keywords

Hawthorn, *Crataegus mexicana*, respiratory diseases, diabetes mellitus, Traditional Mexican Medicine.

Antecedentes

Desde la época prehispánica, el árbol de tejocote ha sido empleado por la población mexicana como alimento y también con fines medicinales (Bye y Linares, 1990; Martínez, 1959). Sus frutos poseen una gran relevancia desde el punto de vista cultural y comercial debido a que forman parte de las fiestas tradicionales como Día de Muertos y Navidad (Núñez-Colín *et al.*, 2008).

Los frutos pueden comerse cocidos o crudos, pero en este último caso el fruto debe estar muy maduro, por lo que abundan las preparaciones dulces en forma de jaleas, ates, mermeladas y almíbar (Bye y Linares, 1990; Hernández, 2015; Sessé M. y J.M. Mociño, 2016). Si bien, puede considerarse que para el tejocote el alimenticio es el principal uso en nuestro país, otros usos del tejocote además del medicinal han sido descritos, tales como, su uso en construcciones; como forraje; ornamental; hortícola como portainjerto del mismo tejocote, pero también de otras especies relevantes comercialmente como el manzano, peral, membrillero y níspero; así como su uso industrial (López-Santiago *et al.*, 2008; Martínez, 1959). En recientes años, los usos industrial y medicinal del tejocote han cobrado especial relevancia debido a que se ha reconocido el importante potencial del tejocote en ambas áreas, sin que hasta el momento se haya desarrollado dicho

potencial, de tal manera que incluso se le ha considerado como una planta desaprovechada o subutilizada según varios autores (Lozano-Grande *et al.*, 2016; Vera-Sánchez *et al.*, 2021). En el caso de los usos industriales, el tejocote se utiliza ampliamente debido a sus contenidos y calidad de pectina como espesante y gelificante en las industrias alimenticia, farmacéutica, cosmética y de polímeros, entre otras. De la misma manera, la pectina del tejocote en combinación con otras sustancias se ha propuesto para incrementar la vida postcosecha de diversos productos hortícolas (Martínez-Mendoza *et al.*, 2020). Reyes Becerril *et al.*, en 2019, demostraron que la nanoencapsulación de la pulpa del fruto del tejocote podría ser utilizada en el campo de la acuicultura debido a las propiedades biológicas exhibidas que favorecen el sistema inmune de los peces, como el caso del kampachi (*Seriola rivoliana*). Sin embargo, en el caso del uso medicinal, en la Medicina Tradicional Mexicana su uso es notoriamente escaso en comparación con el amplio uso que presentan en países asiáticos otras especies de *Crataegus*. Aún más, algunos de los usos del tejocote reportados en Medicina Tradicional Mexicana se refieren al tratamiento de enfermedades de alta incidencia en México y que, por lo tanto, podrían representar una alternativa en dichos tratamientos (Cervantes-Paz *et al.*, 2018). Así, en la presente contribución, los autores pretendemos dar a conocer a la población general, la información más actualizada acerca de los usos medicinales del tejocote en la Medicina Tradicional Mexicana, así como también transmitir la información referente a los avances científicos que en un futuro próximo podrían sentar las bases necesarias para la elaboración de un medicamento basándose en tejocote y que pudiera resultar útil en el tratamiento de enfermedades que afectan a la población mexicana, a partir de un recurso natural propio.

Generalidades y situación actual del tejocote en México

El nombre común o popular del tejocote proviene del término náhuatl “Texócotl” = fruto de piedra ('tetl' = piedra; 'xocotl' = fruto) (Bye y Linares, 1990). Otros nombres comunes conocidos son “manzanita”, “manzanilla colorada”, “npeni” (otomí), “karhasi” (purhé), “tejocote criollo”, “tejocote chico” (Aguilar *et al.*, 1994). Su nombre científico es *Crataegus mexicana* Moc. & Sessé ex DC. y pertenece a la familia botánica de las *Rosaceae*. Es un árbol nativo de México, que se distribuye principalmente en las zonas montañosas del Eje Neo-Volcánico y la Sierra Madre del Sur, llegando hasta Guatemala (WFO, 2024). Desde la época prehispánica, se tienen registros de que los frutos de tejocote fueron colectados para consumo humano y sembrados en huertas de los pueblos indígenas (Núñez-Colín, 2009). En el Siglo XVI, Francisco Hernández lo registra como un árbol que “da manzanas parecidas a las nuestras, pero pequeñas, no mayores que nueces, amarillas, muy duras



antes de la madurez, pero tan blandas casi como manteca cuando están maduras, de sabor, en mí sentir, ingrato, pero que a muchos no les desagrada” (Hernández, 2015). Así mismo, Fray Bernardino de Sahagún lo menciona como un fruto astringente y da una jalea excelente (Estrada, 1989). En la actualidad, se cultiva con fines comerciales principalmente en el estado de Puebla, donde se concentra más del 95 % de la producción nacional con un total de 4.1 mil toneladas (SIAP, 2018). No obstante, dicha producción anual del tejocote sigue considerándose como baja o pobre debido a que no se tienen registros de haber superado nunca las 5000 toneladas anuales (Núñez-Colín, 2009). De esta manera, dado que el tejocote es un recurso natural mexicano que se utiliza desde la época prehispánica hasta nuestros días, que además podría considerarse de fácil acceso, ya que se encuentra distribuido en todas las zonas montañosas del país, y que también resulta de interés en el área industrial, se ha puesto atención en su actual conservación tanto en medios silvestres como cultivados, así como su explotación. Algunas propuestas en este tenor se enfocaron en la conservación del germoplasma donde se obtuvo como resultado la caracterización de 49 genotipos basados en la identificación, selección y caracterización de caracteres vegetativos y reproductivos, tales como: altura de los árboles, diámetro y color de los frutos, presencia de espinas en las ramas, estructuras foliares, número de brotes en la fructificación, etc. (Nieto-Ángel *et al.*, 1996). Mientras que otros estudios se han enfocado en el establecimiento de áreas de conservación prioritarias basadas en análisis multi-criterios, tales como número de variedades cultivadas, números de usos, diversidad fenotípica, diversidad ecogeográfica, áreas de agricultura, entre otros. Con base en esta información se identificaron 3 estados de la República Mexicana como áreas de conservación prioritarias para el tejocote tanto en forma salvaje como cultivada y que, adicional al estado de Puebla, son: Chiapas, Estado de México y Morelos (Vera-Sánchez, *et al.*, 2021). Así, la situación actual y las características y usos del tejocote en nuestro país, poco a poco ganan la atención y el interés de más sectores que finalmente puedan valorar este recurso nacional ancestral.

Usos del tejocote en Medicina Tradicional Mexicana

Los primeros registros del uso medicinal del tejocote los encontramos en el siglo XVI, donde se recomendaban los brotes tiernos en agua para los exantemas (erupciones en la piel) y mitigar el calor junto a brotes de capulín (Hernández, 2015), además su raíz se usaba como aperitivo y contra la hidropesía (Estrada, 1989). Ya a principios del siglo XX, se recomendaban los frutos secos en cocimiento para la tos y la raíz se tomaba como diurético (Martínez, 1989). En la actualidad, quizás el uso medicinal del tejocote más reportado en Medicina Tradicional Mexicana es para el tratamiento de enfermedades de las vías respiratorias como la tos, donde se toma el cocimiento de las hojas y

flores. Para el resfrío pueden mezclarse los frutos del tejocote con hojas de chirimoya y preparar un té que se bebe como agua de tiempo frío o caliente (Aguilar *et al.*, 1996). En el estado de Morelos se ha reportado su uso no solo para la tos, sino además para problemas de los bronquios, donde se come el fruto del tejocote más un cocimiento de preparado con los frutos del tejocote, canela, agua y miel, y se bebe 3 veces al día. Si además se tiene congestión en el pecho, las hojas del tejocote se calientan y se aplican diariamente al enfermo como emplasto (Monroy-Ortiz y Castillo-España, 2007). También se ha reportado el uso del tejocote para la disentería en el estado de Chiapas, para refrescar el estómago en el Estado de México, y como diurético en el estado de Hidalgo (Aguilar *et al.*, 1994). Otro uso del tejocote en la Medicina Tradicional Mexicana es para adelgazar y quemar calorías, donde se bebe como agua de uso con base en una preparación con agua y otras plantas como lima y cocolmeca (Monroy-Ortiz y Castillo-España, 2007). Asimismo, el tejocote se ha reportado para el tratamiento de la diabetes, donde se prepara un té con la raíz del tejocote que se bebe como agua de uso hasta obtener mejoría (Aguilar *et al.*, 2018). Otros reportes indican que para tratar la diabetes se prepara un té de tejocote, zarzamora y raíces del nopal que se bebe como agua de uso o al menos 3 veces al día (Monroy-Ortiz y Castillo-España, 2007). En años recientes, aunado al uso para diabetes, se presenta la recomendación de la ingesta del cocimiento de la raíz de tejocote junto con la raíz de lima y de nopal para adelgazar (Aguilar *et al.*, 2018). De esta manera, los usos del tejocote en Medicina Tradicional Mexicana proporcionan una valiosa información que representa el punto de partida de investigaciones experimentales enfocadas en el descubrimiento de nuevas entidades químicas, así como de procesos metabólicos involucrados en enfermedades que afectan a la población mexicana de manera importante y que se describen brevemente a continuación.

Evidencia científica de las propiedades terapéuticas del tejocote

Científicos mexicanos llevaron a cabo experimentos para evaluar los extractos obtenidos de las hojas del tejocote en un modelo de experimentación animal enfocado en músculo liso traqueal. Los resultados de estos experimentos mostraron efectos positivos en el relajamiento de dichos músculos, con lo que se indicó el efecto benéfico sobre el músculo liso de las vías respiratorias, y de la misma manera, se avaló el uso descrito en medicina tradicional. Curiosamente, cuando en estos mismos experimentos se intentó fraccionar el extracto activo para conocer los componentes responsables de dicha actividad relajante, la actividad ya no se detectó.



Así, los científicos responsables de estos experimentos reportaron que el extracto sin fraccionar del tejocote es el que posee los componentes necesarios que producen el efecto relajante sobre los músculos de las vías respiratorias (Arrieta *et al.*, 2010).

Por otro lado, y concerniente al uso del tejocote en la Medicina Tradicional Mexicana para la diabetes, dado que la diabetes mellitus se caracteriza por la elevación de los niveles de glucosa en sangre, algunos estudios científicos se enfocaron en las propiedades hipoglucemiantes (disminuir los niveles de glucosa en sangre) del tejocote. Andrade-Cetto y Heinrich reportaron en el año 2005 que el extracto de la raíz del tejocote exhibió moderada actividad hipoglucemiante en un modelo animal de conejos. Años más tarde, se reportaron las propiedades antioxidantes de los extractos de la cáscara del tejocote (Méndez-Iturbide *et al.*, 2013) que pueden considerarse como otra propiedad involucrada en los posibles efectos antidiabéticos del tejocote, ya que los procesos de daño oxidativo se han reconocido como determinantes en el establecimiento y progresión de la diabetes mellitus (Calderón *et al.*, 2013). Otros estudios establecieron las propiedades antioxidantes del extracto de acetona de la cáscara del tejocote específicamente sobre los eritrocitos (células de la sangre que transportan oxígeno), donde el efecto protector contra daño oxidativo se observó hasta por 28 días revelando así un potente efecto antioxidante (Banderas-Toribay *et al.*, 2015). Finalmente, el estudio de Robles-Botero *et al.*, 2020, también dirigido a la evaluación de las propiedades antioxidantes del tejocote, reveló que la semilla y el fruto del tejocote son las partes del árbol que presentaron mayor efecto antioxidante. Aún más, en este estudio se logró la identificación de los compuestos químicos posiblemente responsables de dichas propiedades antioxidantes, tales como los flavonoides y ácidos orgánicos, principalmente, epicatequina, vitexina, ácido ascórbico y ácido clorogénico.

Discusión Académica

A pesar de que el tejocote (*Crataegus mexicana*) es un árbol de origen mexicano con amplia distribución en nuestro país, que se cultiva y se consume en una variedad de alimentos, que se utiliza en la medicina tradicional, que posee interés industrial, y que se vincula con tradiciones o usos ceremoniales, es considerado como poco utilizado y también poco estudiado (Lozano-Grande *et al.*, 2016; Vera-Sánchez *et al.*, 2021). Como se ha mencionado con anterioridad, respecto de sus usos medicinales en la Medicina Tradicional Mexicana, aunque se han identificado algunos compuestos químicos como flavonoides y ácidos orgánicos con efectos antioxidantes, las moléculas activas responsables de las propiedades medicinales sobre sistema respiratorio y para el tratamiento de diabetes, siguen sin conocerse, ya que dichos estudios se enfocaron en los efectos biológicos a nivel

experimental del tejocote, pero sin definir los posibles compuestos activos. De manera interesante, un estudio publicado por Ornelas-Lim *et al.*, 2012, reportó la presencia de los compuestos epicatequina y rutina en el extracto preparado con las hojas de *Crataegus mexicana*, pero donde los autores mismos mencionan que su estudio fue dirigido a la búsqueda de compuestos químicos que pudieran ser útiles en el tratamiento de enfermedades cardiovasculares debido a que otras especies pertenecientes al género *Crataegus spp.* han sido reportadas con propiedades medicinales para este fin en el continente asiático. Por lo tanto, dicho estudio, a pesar de que se enfocó en la especie *Crataegus mexicana*, no fue basado en usos reportados en la Medicina Tradicional Mexicana como son las enfermedades respiratorias y la diabetes (Ornelas-Lim *et al.*, 2012).

Perspectivas y consideraciones

El principal uso del tejocote (*Crataegus mexicana*) en México es el alimenticio, pero también presenta uso medicinal, para la construcción, como forraje, ornamental, hortícola e industrial. El tejocote representa en México una posible fuente aún no explorada de nuevos compuestos que pudieran ser útiles y complementarios en el desarrollo de nuevos fármacos para el tratamiento de enfermedades respiratorias y diabetes, a partir de un recurso natural de gran accesibilidad para los mexicanos y que se basa en el conocimiento aportado por nuestros pueblos ancestrales a través de su uso en la Medicina Tradicional Mexicana. Dicha área de investigación representa una oportunidad de interés para estudios científicos de amplia índole que permitiría proporcionar las bases científicas rigurosas para el uso terapéutico del tejocote. De esta manera, el tejocote representa un recurso natural mexicano de gran valía que vale la pena investigar.

Referencias

- Aguilar, A., J.R. Camacho, S. Chino, P. Jácquez, y M.E. López. 1994. Herbario Medicinal del Instituto Mexicano del Seguro Social. Instituto Mexicano del Seguro Social. D.F. México. 253 pp.
- Aguilar, A., J.R. Camacho, S. Chino, P. Jácquez, y M.E. López. 1996. Plantas medicinales del Herbario IMSS. Cuadros básicos por aparatos y sistemas del cuerpo humano. Instituto Mexicano del Seguro Social. Primera reimpresión. D.F. México. 218 pp.
- Aguilar, A., M.E. López y S. Xolalpa. 2018. Herbolaria y Diabetes. Estampa Artes Gráficas. Ciudad de México, México. 61 pp.



- Andrade-Cetto, A. y M. Heinrich. 2005. Mexican plants with hypoglycaemic effect used in the treatment of diabetes. *Journal of Ethnopharmacology* 99 (3): 325-348.
- Arrieta, J., D. Siles-Barrios, J. García-Sánchez, B. Reyes-Trejo y M.E. Sánchez-Mendoza. 2010. Relaxant effect of the extracts of *Crataegus mexicana* on guinea pig tracheal smooth muscle. *Pharmacognosy Journal* 2(17): 40-46.
- Banderas-Toribay J.A., M. Cervantes-Rodríguez, M. Grada-Sánchez, M. Espíndola-Lozano, E. Cuevas-Romero, A. Navarro-Ocaña y D. Méndez-Iturbide. 2015. Antioxidant-mediated protective effect of hawthorn (*Crataegus mexicana*) peel extract in erythrocytes against oxidative damage. *African Journal of Food Science*, 9(4), 208-222.
- Bye, R. y E. Linares. 1990. Mexican market plants of 16th century. I. Plants recorded in *Historia Natural de Nueva España*. *Journal of Ethnobiology* 10(2): 151-168.
- Calderón Salinas, J.V., E.G. Muñoz Reyes y M.A. Quintanar Escorza. 2013. Estrés oxidativo y diabetes mellitus. *Revista de Educación Bioquímica* 32(2): 53-66.
- Cervantes-Paz, B., J.D.J. Ornelas-Paz, A.A. Gardea-Béjar, E.M. Yahia, C. Rios-Velasco, P.B. Zamudio-Flores, S. Ruiz-Cruz y V. Ibarra-Junquera, V. 2018. Compuestos fenólicos de tejocote (*Crataegus spp.*): su actividad biológica asociada a la protección de la salud humana. *Revista Fitotecnia Mexicana* 41(3): 339-349.
- Estrada, E. 1989. *El Códice Florentino. Su información Etnobotánica*. Colegio de Postgraduados. Estado de México. 399 pp.
- Hernández, F. 2015. *Obras completas. Tomo 3. 2a edición*. UNAM. México. 554 pp
- López-Santiago, J., R. Nieto-Ángel, A.F. Barrientos-Priego, E. Rodríguez-Pérez, M.T. Colinas-Leon, M.W. Borys, y F. González-Andrés. 2008. Selección de variables morfológicas para la caracterización del tejocote (*Crataegus spp.*). *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 14(2), 97-111.
- Lozano-Grande, M.A., S. Valle-Guadarrama, E. Aguirre-Mandujano, C.O. Lobato-Calleros y F. Huelitl-Palacios. 2016. Films based on hawthorn (*Crataegus spp.*) fruit pectin and candelilla wax emulsions: characterization and application on *Pleurotus ostreatus*. *Agrociencia* 50(7): 849-866.
- Martínez, M. 1959. *Plantas útiles de la flora mexicana*. Ediciones Botas. México. 621 pp.
- Martínez, M. 1989. *Las plantas medicinales de México. Sexta edición*. Ediciones Botas. México. 656 pp.

- Martínez-Mendoza, A.A., O. Franco-Mora, J.R. Sánchez-Pale, J.R. Rodríguez-Núñez, y A. Castañeda-Vildózola. 2020. Evaluación de recubrimientos comestibles a base de pectina de tejocote (*Crataegus mexicana* Moř. & Sess, ex DC., Rosaceae) en la poscosecha de tihuixocote (*Ximenia americana* L., Olacaceae)." Acta Agrícola y Pecuaria 6: E0061004.
- Méndez-Iturbide, D., J. A. Banderas-Tarabay, A. Nieto-Camacho, A. Rojas-Chávez y M.G. García-Meza. 2013. Antioxidant capacity of extracts from hawthorn (*Crataegus mexicana*) skin. African Journal of Food Science 7(6): 150-158.
- Monroy-Ortiz, C. y P. Castillo-España. 2007. Plantas medicinales utilizadas en el estado de Morelos. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, México. 405 pp.
- Nieto-Ángel, R., A. Barrientos-Villaseñor y M.W. Borys. 1996. Domesticación del tejocote (*Crataegus spp.*) en México: un potencial frutícola. ITEA Extra17: 229-235.
- Núñez-Colín, C.A., R. Nieto-Ángel, A.F. Barrientos-Priego, S. Segura, J. Sahagún-Castellanos y F. González-Andrés. 2008. Distribución y caracterización eco-climática del género *Crataegus* L. (Rosaceae, SUBFAM. Maloideae) en México. Revista Chapingo. Serie Horticultura 14(2): 177-184.
- Núñez-Colín, C.A. 2009. Áreas prioritarias para coleccionar germoplasma de (*Crataegus* L.) en México con base en la diversidad y riqueza de especies. Agricultura Técnica en México 35(3): 333-338.
- Ornelas-Lim, C., F.J. Luna-Vázquez, A. Rojas-Molina y C. Ibarra-Alvarado. 2021. Development of a quantified herbal extract of hawthorn *Crataegus mexicana* leaves with vasodilator effect. Saudi Pharmaceutical Journal 29(11): 1258-1266.
- Reyes-Becerril, M., A. Martínez-Preciado, C. Guluarte, K. Guerra, D. Tovar-Ramírez, M.E. Macías y C. Angulo. 2019. Phytochemical composition and immunobiological activity of Hawthorn *Crataegus mexicana* nanoencapsulated in Longfin yellowtail *Seriola rivoliana* leukocytes. Fish & Shellfish Immunology, 92: 308-314.
- Robles-Botero, M.V., E. Ronquillo-de Jesús, C.N. Quiroz-Reyes y M.A. Aguilar-Méndez. 2020. Caracterización e identificación de compuestos bioactivos con actividad antioxidante de la cáscara, pulpa y semilla del fruto de tejocote (*Crataegus mexicana*). TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas 23: 1-10.
- Sessé M. y J.M. Mociño. 2016. Plantae Novae Hispaniae (edición facsimilar). Zamudio Varela, G. (coord.); Ramos, M.P. (ed.). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México. 394 pp.



SIAP Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. El tejocote: fruto con gran valor nutricional. En: <https://www.gob.mx/siap/articulos/el-tejocote-fruto-de-temporada-con-gran-valor-nutricional> (consultado el 08/07/2024).

Vera-Sánchez, K.S., M. Parra-Quijano, R. Nieto-Ángel y A.F. Barrientos-Priego. 2021. Multi-Criteria analysis for the prioritization of areas for the insitu conservation of *Crataegus* L., an underutilized fruit tree in Mexico. *Plants* 10: 2561.

WFO World Flora Online. 2024. *Crataegus mexicana* Moc. & Sessé ex DC. En: <https://www.worldfloraonline.org/taxon/wfo-0001018418> (consultado el 08/07/2024)..

Cita

Huerta-Reyes M. y S. Xolalpa-Molina. Usos del tejocote (*Crataegus mexicana*) en México desde la época prehispánica hasta la actualidad: Relevancia de sus usos medicinales y su potencial desarrollo farmacológico. *Recursos Naturales y Sociedad*, 2025. Vol. 11 (1): 33-42. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0003>

Sometido: 3 de septiembre de 2024

Aceptado: 3 de diciembre de 2024

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editora asociada: Dra. Elizabeth Monreal Escalante

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

One Health in Baja California Sur:
Reflections and Strategic Proposal

Una Salud en Baja California Sur: Reflexiones y propuesta estratégica

Carlos Angulo^{1,3}, Daniela A. Murillo-Cisneros¹, Elizabeth Monreal-Escalante^{1,3},
Alejandro M. Maeda-Martínez¹, Ramón Gaxiola-Robles²,
Hassian León-Montoya^{1,3} y Tania Zenteno-Savín^{1,3*}

Resumen

Aunque están relacionados, los términos **salud** y **Una Salud** se refieren a conceptos diferentes. La Organización Mundial de la Salud define salud como “el estado de completo bienestar físico, mental y social”. El concepto de Una Salud reconoce que la salud de los seres humanos está intrínsecamente relacionada con la salud de los animales y la salud de los ecosistemas. Aunque el término Una Salud aparece apenas en 2007, se puede considerar el origen del concepto de Una Salud desde el siglo IV antes de la era cristiana. En México, uno de los estados más ricos en flora, fauna y áreas naturales, tanto terrestres como marinos es Baja California Sur y es, por ende, un sitio muy atractivo para visitar y establecerse. Sin embargo, garantizar la conservación de esa biodiversidad, a la luz de factores naturales (huracanes, cambio climático) y antropogénicos (urbanización, pesca, turismo), presenta retos que requieren un enfoque multidisciplinario con participación de actores de diferentes sectores y comunidades. En este documento proponemos el enfoque de Una Salud para abordar algunos de los desafíos que implican la salud humana y la conservación de animales, plantas y ecosistemas en Baja California Sur. El trabajo científico en conjunto es la mejor herramienta que tenemos para promover el bienestar de los seres humanos, los animales, y los ecosistemas y, al mismo tiempo, contribuir al desarrollo sostenible de este extraordinario estado.

¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096 – México

²Unidad de Medicina Familiar No. 40. Instituto Mexicano del Seguro Social. Calle del Sol esq. del Río, La Fuente, La Paz, Baja California Sur, C.P. 23088. México

³Laboratorio Nacional de Generación de Vacunas Veterinarias y Servicios de Diagnóstico. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096 – México

*Autor de correspondencia tzenteno04@cibnor.mx (612) 123-8502



Palabras clave

Bienestar, biodiversidad, conservación, sustentabilidad.

Abstract

Although related, the terms **health** and **One Health** refer to different concepts. The World Health Organization defines health as "the state of complete physical, mental, and social well-being." The One Health concept recognizes that human health is intrinsically linked to animal health and the health of ecosystems. Although the term One Health appears only in 2007, the origin of the concept of One Health can be considered as far back as the fourth century BC. In Mexico, one of the richest states in flora, fauna and natural areas, both terrestrial and marine, is Baja California Sur and is, therefore, a very attractive place to visit and settle. However, guaranteeing the conservation of this biodiversity, in light of natural (hurricanes, climate change) and anthropogenic (urbanization, fishing, tourism) factors, presents challenges that require a multidisciplinary approach with the participation of actors from different sectors and communities. In this document we propose the One Health approach to address some of the challenges involved in the human health and conservation of animals, plants and ecosystems in Baja California Sur. Working together is the best tool we have to promote the welfare of animals, humans and ecosystems and, at the same time, contribute to the sustainable development of this extraordinary state.

Keywords

Biodiversity, conservation, sustainability, wellness.

Antecedentes

¿Qué es una salud?

De acuerdo con el Cuadro de Expertos de Alto Nivel para el Enfoque de «Una Salud» (OHHLEP, 2021), "Una Salud es un enfoque unificador integrado que procura equilibrar y optimizar de manera sostenible la salud de las personas, los animales y los ecosistemas." Y añade: "El enfoque reconoce que la salud de las personas, los animales domésticos y silvestres, las plantas y el ambiente en general (incluidos los ecosistemas) están estrechamente relacionados y son interdependientes. Este enfoque interpela a múltiples sectores, disciplinas y comunidades en diversos niveles de la

sociedad, con miras a trabajar conjuntamente para promover el bienestar y neutralizar las amenazas para la salud y los ecosistemas y, al mismo tiempo, hacer frente a la necesidad colectiva de agua potable, energía y aire, alimentos sanos y nutritivos; tomar medidas relativas al cambio climático; y contribuir al desarrollo sostenible” (OHHLEP, 2021).

Recientemente, Zunino (2018) y Mendoza *et al.* (2023) presentaron un recuento y resumen de la historia sobre Una Salud. Los autores reconocen a Hipócrates y Aristóteles (siglo IV antes de la era cristiana), Claude Bourgelap (siglo XVIII) y Rudolf Virchow (siglo XIX) como personas que aportaron al concepto y enfoque de lo que hoy se conoce como Una Salud. Calvin Schwabe hizo contribuciones clave que impulsaron la iniciativa multiinstitucional de Una Salud en los años 1970s. En 2007, la Junta Ejecutiva de la Asociación Americana para Medicina Veterinaria (AVMA) creó un grupo de trabajo que lanzó a iniciativa de Una Salud (“One Health Initiative Task Force”, OHITF), que culminó en 2008 con la alianza tripartita entre la Organización Mundial de la Salud (OMS o WHO), Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y Oficina Internacional de Epizootias (OIE). En el 2022, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) se sumó para formar la alianza cuatripartita Una Salud.

En 1978 en Alma Ata, Kazajistán, se llevó a cabo la Conferencia Internacional sobre Atención Primaria en la que se estableció la "Declaración de Alma Ata". En este documento se enfatiza la importancia de la atención primaria como un enfoque clave para lograr la salud para todos, a través del acceso universal y equitativo a servicios de salud, y se reconoce que la salud es un derecho humano fundamental (WHO, 1978). Esta Declaración destaca la necesidad de integrar esfuerzos en múltiples sectores para abordar los factores sociales, económicos, ambientales, y las interacciones entre ellos que afectan la salud de las poblaciones. Esto se alinea directamente con el concepto de "Una Salud", puesto que los dos conceptos proponen un enfoque integral que reconozca la interconexión entre la salud de los seres humanos, la salud de los animales y plantas, y la salud ambiental. Este enfoque integrador es crucial para abordar desafíos mundiales de salud, por ejemplo, las enfermedades infecciosas (covid-19) y no transmisibles (diabetes), y para facilitar el desarrollo sostenible (WHO, 1978).

¿Por qué Una Salud en Baja California Sur?

Baja California Sur tiene extensas áreas naturales protegidas federales y áreas destinadas voluntariamente a la conservación, las cuales se han clasificado en Reservas de la Biosfera, Parques Nacionales, Áreas de Protección de Flora y Fauna, y Santuarios. De ahí que sus pobladores posean



un profundo sentido del cuidado del ambiente (CONANP). El aislamiento geográfico de la Península de Baja California, que se acentúa en el estado sur, brinda ventajas asociadas al número reducido de personas que la habitan, una sola vía de acceso terrestre, escasas entradas marítimas (puertos) y aéreas (aeropuertos). Un aspecto relevante, desde el punto de vista de los riesgos para la salud por contaminación por el acceso de materiales, mercancías y alimentos de gran escala, es que en Baja California Sur son pocos los puntos de inspección y verificación sanitaria necesarios para mantener la seguridad, el bienestar y la salud del ambiente, animales y humanos.

En este ecosistema natural y sociocultural en el que conviven estrechamente plantas, animales (domésticos y silvestres) y seres humanos, destaca el alto número de científicos en proporción a la población que habita Baja California Sur. Es curioso el hecho de que la niñez y juventud, formada en las instituciones de educación desde nivel básico hasta superior, reciben conocimientos estrechamente asociados a la cultura de la conservación del ambiente. Y esto no es sólo para los profesionistas sino también los prestadores de servicios de oficio que, desde distintas ciencias y disciplinas, estudian, aprenden y realizan sus trabajos considerando el entorno con una visión hacia la sustentabilidad.

En el sector primario de la producción de alimentos (pesqueros, acuícolas, agrícolas y ganaderos) se promueve la sustentabilidad; y aunque existe la transformación de algunos de ellos, no resulta suficiente para la alimentación de toda la población residente y flotante (estudiantes, turistas). Sin embargo, en este Estado podemos encontrar productos alimenticios frescos y saludables, incluso algunos con certificaciones de manejo orgánico y ecológico, que son transformados en platillos apreciados en los restaurantes locales. Para implementar el enfoque de Una Salud debe tenerse en cuenta también que la principal actividad económica (más del 90%) de Baja California Sur está asociada al sector terciario mediante la prestación de servicios turísticos. Los turistas nacionales y extranjeros visitan a la California mexicana con el propósito principal de la contemplación y exploración de la naturaleza, tanto marina como terrestre.

Todo lo expuesto anteriormente, junto con elementos como la alta seguridad social, la escasa contaminación antropogénica, entre otros, nos lleva a pensar que Baja California Sur es un estado ideal para iniciar el establecimiento de un Estado modelo de organización con el enfoque de Una Salud.

¿Por dónde empezar? Problemas públicos en Baja California Sur

Problemas, necesidades, desafíos y retos son innumerables en una sociedad que vive en una península, aislada geográficamente, rodeada de mar y con ambientes áridos y semi-áridos. Sin embargo, algunos de esos problemas han merecido la atención de los gobiernos locales elegidos por la sociedad, convirtiéndose por definición en un problema público porque el gobierno invierte tiempo, personal, dinero y políticas para su atención. El agua dulce es un recurso natural extremadamente escaso en Baja California Sur. Más del 95% del agua que se utiliza en este Estado proviene de los mantos freáticos, lo que significa que debe extraerse del subsuelo. Aunado a ello, la intrusión salina de agua del mar a los mantos freáticos ha provocado agua salinizada. Por lo tanto, éste ha sido un problema público recurrente en la historia de Baja California Sur.

No obstante, existen otros problemas públicos que pueden cambiar en cada gobierno. Por ejemplo, dentro del plan estatal de desarrollo de Baja California Sur (2021-2027) se encuentran ejes específicos que contienen problemas públicos. Algunos de ellos podrían ser de interés para atender mediante el enfoque de Una Salud, considerando la vocación y proyección socioeconómica del Estado, el estilo de vida de sus pobladores y las capacidades profesionales, científicas y tecnológicas con la intención de mejorar la calidad de vida.

- Salud. **Enfermedades** respiratorias agudas, tumores malignos, diabetes.
- Turismo. Participación comunitaria, **conservación y aprovechamiento de recursos**.
- Agricultura y ganadería. **Certificaciones sanitarias**. Salud y nutrición alimentaria.
- Desarrollo forestal sostenible. **Proteger áreas forestales**.
- Pesca y acuacultura. **Ordenamiento y aprovechamiento sustentable y sostenible**.
- Sanidad e inocuidad. **Inspección, vigilancia, verificación y control**.
- Ciencia y tecnología. **Productividad mediante innovación local**.
- Medio ambiente (**Cuidado**) y cambio climático (**Mitigación**).
- Protección de animales domésticos. **Cuidado de la salud animal**, maltrato de mascotas.
- Ordenamiento territorial. **Reservas territoriales**.
- Energías alternativas. **Aprovechamiento y eficiencia energética**.

Actores de la sociedad: su participación es clave en el éxito de Una Salud

Además de los sudcalifornianos por nacimiento y por adopción (3 años de residencia según la Constitución Política del Estado Libre y Soberano de Baja California Sur, Capítulo II, artículo 3, fracción III), es necesaria la participación de las personas que habiten temporalmente en el Estado. El gobierno, instituciones educativas, organizaciones de la sociedad civil y empresas deberían participar en un objetivo común de manera individual o, idealmente, coordinada. Finalmente, entre todos, evaluar los resultados para mejorar continuamente.

Los tres órdenes de gobierno del poder ejecutivo, legislativo y judicial, principalmente a nivel estatal y municipal, son los actores clave porque la sociedad les ha otorgado la responsabilidad legal de organizar la vida pública para atender los problemas que le aquejan. En su estructura organizacional, los gobiernos tienen dependencias (direcciones, subdirecciones, departamentos, coordinaciones, jefaturas) que directamente o través de comités, consejos, entre otros, planean, implementan, y evalúan las acciones para atender las problemáticas. Lo anterior podrían hacerlo considerando el enfoque de Una Salud para asegurar el bienestar y la salud de humanos, animales y ecosistemas de manera sostenible.

Existen, además, instituciones educativas desde el nivel básico hasta el superior (incluyendo estudios de posgrado) con profesionistas con una amplia diversidad de especialidades académicas con el propósito de transmitir conocimientos a la niñez y juventud. En este sentido, la educación de niños, jóvenes y maestros en Una Salud permitiría concientizar una forma más integral de resolver problemas que afectan a todos. Las organizaciones de la sociedad civil como colegios, agrupaciones, entre otras, han sido fundamentales con acciones beneficiosas en la sociedad para solucionar problemas, principalmente en pequeñas comunidades. Si las organizaciones de la sociedad civil utilizan el enfoque de Una Salud también reforzarían la educación y actividades específicas para que niños, jóvenes y adultos resuelvan los problemas de su comunidad.

Las empresas pueden optar por recibir la distinción de “empresas socialmente responsables”; esto puede originar, a su vez, una proyección con reconocimiento de “Una Salud”, lo que describiría que en ellos se ofrecen productos y servicios mediante el enfoque Una Salud. Este tipo de distinciones las podrían otorgar los gobiernos locales en colaboración con la OMS, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA o WOA) y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), ya que estas organizaciones promueven y asesoran planes de acción que garanticen el enfoque Una Salud.

No obstante, el mecanismo de participación de todos los actores desde todos los sectores es necesario para elaborar, implementar y evaluar un programa (con un plan y financiamiento orientado) de Una Salud en Baja California Sur.

¿Cómo nos organizamos? Flujograma de trabajo inicial

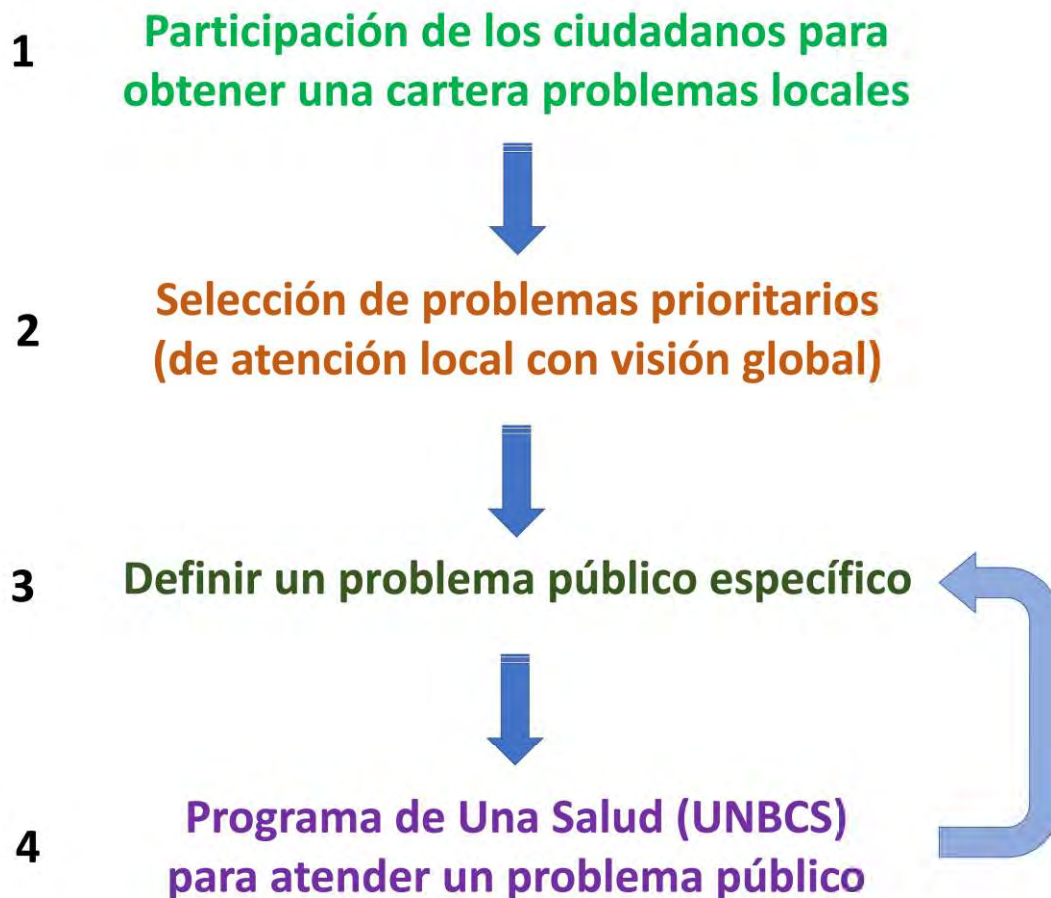
Un flujograma es un diagrama (un gráfico) que representa un proceso. Existen muchos problemas en la sociedad que merecen atención. Todos ellos se pueden identificar mediante la participación ciudadana. En la Figura 1 se propone un flujograma guía para solucionar problemas públicos con el enfoque de Una Salud en Baja California Sur.

El primer paso es provocar la participación de las personas para que indiquen los problemas que tienen y, con ello, crear una cartera que contenga un listado de prioridades identificadas por la sociedad. Los ciudadanos involucrados deben provenir de todos y cada uno de los sectores (sociedad civil, empresarial, gubernamental, educativo) representados en el Estado. El segundo paso es realizar la selección de los problemas prioritarios para su atención. En este punto se propone considerar la selección con base en problemas que han sido identificados como mundiales, es decir, de atención local con una visión global. La forma de resolver nuestros problemas locales con el enfoque de Una Salud podría servir para otras localidades que tengan el mismo problema y, viceversa, conocer los logros de otras entidades, a nivel nacional e internacional, nos podría ayudar para resolver el de nuestra localidad. El tercer paso es definir, de los problemas prioritarios, un problema público específico porque la participación de los gobiernos es indispensable para organizar a los otros sectores de la sociedad (civil, educativo, empresarial) para planear, implementar y evaluar la posible solución con el enfoque de Una Salud. El cuarto paso es elaborar el programa de Una Salud en Baja California Sur para atender un problema público específico, el cual integraría un plan de acción (considerando la guía internacional One Health; WHO, 2024), un mecanismo de implementación, un proceso de valoración-retroalimentación, y financiamiento.

Existen preguntas básicas que deberían hacerse para cada problema público, entre ellas las siguientes tres. ¿Cómo este problema se interrelaciona con la salud humana, animal, vegetal y ambiental? ¿Cómo se podría abordar este problema desde todos los sectores para ofrecer soluciones de manera integral? ¿Quiénes, desde el ámbito de su función y/o competencia, podrían contribuir en la solución?

Salud Humana, Animal, Vegetal y Ambiental

Flujograma para solucionar problemas públicos con el enfoque de Una Salud en Baja California Sur



Tres preguntas a resolver:

¿Cómo este problema se interrelaciona con la salud humana, animal y ambiental?

¿Cómo se podría abordar desde los tres frentes para proponer una solución integral?

¿Quiénes desde el ámbito de su especialidad podrían contribuir a la solución?

Figura 1. Guía para solucionar problemas públicos con el enfoque de Una Salud en Baja California Sur.

Consideremos tres ejemplos de problemas públicos como casos prioritarios (Fig. 2). Tratemos de resolver, en cada uno de estos ejemplos, las tres preguntas planteadas en el flujograma (Fig. 1).

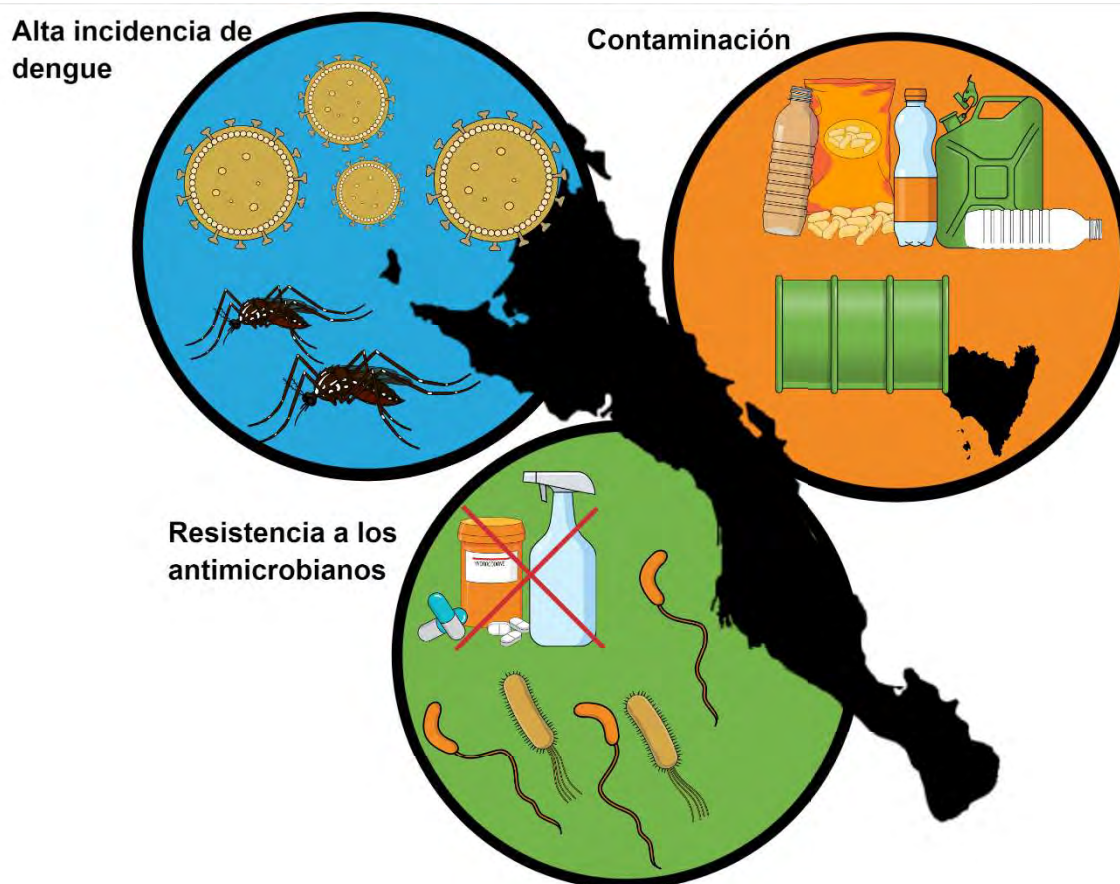


Figura 2. Problemas públicos seleccionados en Baja California Sur.

Ejemplos de casos prioritarios en Baja California Sur

Problema público 1: Resistencia a los antimicrobianos

Los antimicrobianos son sustancias químicas utilizadas para inhibir o eliminar patógenos en seres humanos, animales y plantas (Fig. 2). En particular, los antimicrobianos se pueden clasificar según su acción. Aquellos que actúan sobre bacterias se denominan antibióticos; los que afectan a virus, antivirales; los que combaten hongos, antifúngicos; y los que atacan parásitos, antiparasitarios. Los patógenos pueden evolucionar con el tiempo mediante mutaciones y transferencias genéticas que les confieren nuevas capacidades, y una de ellas es la resistencia a los antimicrobianos (RAM). La RAM hace que bacterias, virus, hongos y parásitos sean más complejos, difíciles, y en algunos casos, imposibles de eliminar, lo que vuelve ineficaces a fármacos, antibióticos y otros productos

comerciales (WHO, 2021). En 2019, las infecciones por bacterias resistentes a antimicrobianos causaron 5 millones de muertes a nivel mundial y se estima que, para el año 2050, este problema podría provocar más de 10 millones de muertes anuales (FAO, 2024). Además, la RAM en la próxima década podría resultar en pérdidas económicas de 3.4 billones de dólares al año y en un aumento de la pobreza que afectaría a más de 24 millones de personas (UNEP, 2024). Por ejemplo, en América Latina en el año 2019 se registraron 338 muertes por patógenos RAM (Antimicrobial Resistance Collaborators, 2022). Por ello, el uso racional de antimicrobianos, estrategias no farmacológicas, medidas de prevención, y campañas de educación y concientización se han realizado como alternativas para disminuir estas pérdidas y los problemas futuros (WHO, 2021).

¿Cómo el problema de resistencia a antimicrobianos se interrelaciona con la salud humana, animal, vegetal y ambiental? Los patógenos resistentes a antimicrobianos representan un riesgo significativo para la salud humana, animal, vegetal y ambiental. En este sentido, la OMS, FAO, PNUMA, OMSA, etc, (WHO, 2021; FAO, 2022; UNEP, 2024; WOA, 2024) han compartido información relevante sobre el tema. En la esfera ambiental, el uso de antibióticos en suelos y cuerpos de agua puede inducir multidrogoresistencia en bacterias, que posteriormente pueden infectar a animales y personas en contacto con esas áreas o a través del agua potable (WHO, 2021). En la salud animal, el tratamiento de animales con antibióticos puede provocar la aparición de bacterias resistentes en sus excretas o estiércol, contaminando el suelo y, potencialmente, afectando a la fauna silvestre (WOA, 2024). Esto no sólo genera nuevas cepas bacterianas, sino que también impacta la producción agrícola y ganadera, afectando a los 1,300 millones de personas que dependen del ganado y a más de 20 millones que dependen de la acuicultura a nivel mundial (UNEP, 2024). Además, los productos y subproductos alimenticios derivados de animales pueden contener residuos de antimicrobianos o microbios resistentes que pueden transmitir a los seres humanos. La resistencia a los antimicrobianos también afecta la salud vegetal, donde el uso indiscriminado de antibióticos en cultivos y en el manejo del suelo altera el equilibrio de la microbiota en los ecosistemas, posiblemente afectando la salud de las plantas al interferir con los microorganismos beneficiosos para los sembradíos (FAO, 2022). Al igual que los productos de origen animal, los de origen vegetal pueden contener trazas de antimicrobianos que al consumirlos pueden provocar la aparición oportunista de otros microorganismos resistentes (WOA, 2024). Por último, la salud humana no sólo puede ser afectada en el ámbito médico, sino también en las áreas económica y social. Probablemente, el ser humano sea el principal responsable de la velocidad de aparición de estas cepas resistentes a los antimicrobianos (OMS, 2021). Los microorganismos RAM pueden generarse, transmitirse y propagarse entre humanos, animales, productos vegetales y el

ambiente. Por esta razón, la resistencia a los antimicrobianos se considera un problema que requiere el enfoque de Una Salud (SENASICA, 2023).

¿Cómo se podría abordar el problema de la resistencia a los antimicrobianos desde todos los sectores para ofrecer soluciones de manera integral? La resistencia a los antimicrobianos es un desafío crítico debido a la complejidad del problema, ya que, la cadena de transmisión de los patógenos RAM está interconectada a través de la cadena alimenticia; comenzando con las plantas infectadas, pasando por los animales que consumen estas plantas, y continuando con los humanos que ingieren la carne contaminada y, finalmente, la proliferación de un patógeno RAM llega a afectar el ambiente (WHO, 2021). Abordar esta problemática con el enfoque de Una Salud requiere la colaboración activa y continua de dependencias gubernamentales, académicas, empresariales y la sociedad en general (UNEP, 2024). En México, para iniciar en el ámbito de la salud vegetal y animal, el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) ha establecido un plan de acción para implementar estrategias contra las RAM. Estas estrategias incluyen la concienciación y comprensión de las RAM mediante la comunicación, educación y capacitación, así como el uso óptimo de los agentes antimicrobianos en la producción agropecuaria. Además, se busca mejorar la higiene y las medidas sanitarias en la salud animal y vegetal (SENASICA, 2024, 2023). En el ámbito de la salud humana, la Secretaría de Salud (SSA), el Instituto Mexicano del Seguro Social Régimen Ordinario (IMSS-Ordinario), el Instituto Mexicano del Seguro Social del Bienestar (IMSS-Bienestar) y la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) han establecido diversos programas, campañas y foros de concienciación sobre la aplicación adecuada de antibióticos y los fundamentos básicos de las RAM. Ejemplos de estos esfuerzos incluyen la campaña "Prevengamos Juntos la Resistencia a los Antimicrobianos" y la "Estrategia Institucional Contra la Resistencia a los Antimicrobianos" (SSA, 2023; IMSS, 2024). Además, se ha promovido el uso de nuevas tecnologías a través de cursos virtuales para informar y prevenir las RAM (INSABI, 2023). En 2019, la COFEPRIS en colaboración con académicos de la Facultad de Química de la UNAM llevaron a cabo el primer simposio sobre el uso de antibióticos y la concienciación sobre antimicrobianos (COFEPRIS, 2019). En el ámbito del ambiente, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), junto con SENASICA, SSA y el IMSS, han promovido la concienciación, vigilancia, investigación y prevención de las RAM en el entorno. Además, han facilitado la participación de instituciones nacionales e internacionales en el desarrollo de nuevos medicamentos, herramientas de diagnóstico y vacunas contra los patógenos RAM (DOF, 2018). A estos esfuerzos gubernamentales y académicos, se debe invitar la participación activa de las

empresas y la sociedad en general para involucrarles cada vez más en acciones que prevengan y controles los patógenos RAM.

¿Quiénes, desde el ámbito de su función y/o competencia, podrían contribuir en la solución? En Baja California Sur, como un ejemplo, el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) en colaboración con otras instituciones ha llevado a cabo esfuerzos para abordar el problema de la RAM. La investigación y desarrollo de estrategias innovadoras para combatir la creciente amenaza de patógenos resistentes en la región se ha realizado a través de diversos proyectos científicos, contribuyendo a la búsqueda de soluciones prácticas y sostenibles.

Entre los proyectos más destacados se encuentra la evaluación de la actividad antimicrobiana e inmunoestimulante de bacterias aisladas en la Laguna Ojo de Liebre, Guerrero Negro, y en una ventila volcánica hidrotermal de Bahía Concepción, lugares ubicados en Baja California Sur. En este estudio, de los 340 microorganismos aislados, 15 mostraron actividad antimicrobiana contra bacterias patógenas como *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium* y *Aeromonas hydrophila*. La bacteria con la mayor actividad antimicrobiana identificada fue *Bacillus hisashii*, inhibiendo el crecimiento de todas las cepas patógenas. Además, 10 de las cepas aisladas demostraron actividad inmunoestimulante en leucocitos de ratón (Rodríguez-Valdez, 2017). En otra investigación, se aislaron bacterias de ambientes extremos de Baja California Sur para evaluar su potencial como agentes de control biológico contra *Clavibacter michiganensis subsp. michiganensis* (Cmm), una bacteria responsable del cáncer bacteriano en tomate. De las seis bacterias aisladas, pertenecientes a los géneros *Bacillus* y *Ochrobactrum*, las cepas de *Bacillus spp.* B475B, B367O y B367R lograron inhibir más del 95% del crecimiento de Cmm. Estas cepas mantuvieron su efecto inhibitorio incluso después de seis meses a 30 °C o tras ser sometidas a tratamiento por calor (121 °C y 15 psi, en una autoclave). Además, en los ensayos realizados *in vitro*, los frutos inoculados con las cepas se mantuvieron viables (Guerra-Contreras, 2021).

Otra estrategia para combatir la resistencia a los antimicrobianos es el uso de extractos de plantas medicinales encontradas en Baja California Sur. Las plantas medicinales contienen compuestos bioactivos y antioxidantes que pueden servir como alternativas a los antibióticos en la salud humana, animal, vegetal y ambiental. Además, representan una fuente natural, económica y fácil de obtener. Por ejemplo, la planta endémica de Baja California Sur, Damiana de California (*Turnera diffusa*), ha demostrado un notable potencial antibacteriano para sintetizar nanopartículas de oro eficaces contra *Vibrio parahaemolyticus*, *A. hydrophila*, *Salmonella enteritidis*, *E. coli* y *Listeria*

monocytogenes. En este contexto, la “nanotecnología verde” se presenta como una valiosa alternativa para enfrentar la resistencia a los antimicrobianos (Reyes-Becerril *et al.*, 2021).

Problema público 2: Alta incidencia de dengue

El dengue es una enfermedad viral transmitida por mosquitos del género *Aedes* que afecta principalmente a regiones tropicales (Fig. 2). Existen cuatro serotipos de virus del dengue (DENV), denominados DENV1, DENV2, DENV3 y DENV4, genéticamente distintos que pueden ser transmitidos al humano. Ello favorece contraer dicha enfermedad en más de una ocasión, provocando, en algunos casos, síntomas graves en reinfecciones, ocasionando incluso la muerte. La falta de control del mosquito vector y de infraestructura sanitaria ha contribuido a la propagación del DENV. Por lo anterior, se han buscado estrategias de control de mosquitos para reducir los casos de enfermedad y muerte por dengue. Además, se ha explorado el desarrollo de nuevas vacunas con base biotecnológica contra el DENV, que prevengan la manifestación de la infección y que contribuyan al combate y erradicación de la enfermedad.

¿Cómo el problema de la alta incidencia del dengue se interrelaciona con la salud humana, animal, vegetal y ambiental? La alta incidencia de casos de dengue, una enfermedad transmitida por mosquitos, está profundamente ligada a una compleja red de factores que requieren un enfoque multidisciplinario para su entendimiento. El ámbito de salud humana es el más afectado por este problema, ya que hasta el momento no hay una vacuna efectiva, y los casos prevalecen considerablemente afectando perjudicialmente al humano; aunque la mayoría de los casos de dengue son reportados como no grave, los síntomas son incapacitantes y, en los casos graves, el dengue puede ser mortal. El problema de la alta incidencia de dengue se interrelaciona con la salud animal debido al uso excesivo de pesticidas y fertilizantes en la agricultura intensiva, lo que puede afectar negativamente a los depredadores naturales de los mosquitos, como los peces y las libélulas, favoreciendo la proliferación del insecto vector y, por consecuencia, su distribución masiva. Aunque el dengue no representa una enfermedad zoonótica, es decir, no se transmite de animales a humanos, el mosquito vector del género *Aedes*, principalmente el *Aedes aegypti* y el *Aedes albopictus*, también pueden picar a otros animales y éstos pueden actuar como huéspedes para el DENV. Varios estudios han demostrado la presencia de ácidos nucleicos y/o anticuerpos del DENV en la fauna neotropical, incluidos los murciélagos que pueden habitar en hogares, lo que sugiere que algunas especies de murciélagos pueden ser susceptibles a la infección por DENV (Vicente-Santos *et al.*, 2017). Además, animales, como las aves, pueden servir como indicadores de la presencia de mosquitos vectores en un área determinada, inclusive se ha reportado presencia de

larvas en bebederos de ganado, lo que incrementa considerablemente la propagación de la enfermedad al humano (Diéguez-Fernández *et al.* 2009; Cepeda-Palacios *et al.*, 2017). Por lo anterior, se considera que una alta densidad de población animal infectada podría aumentar la disponibilidad de sangre para los mosquitos, y en teoría, aumentar la población de mosquitos y, por ende, el riesgo de transmisión del DENV a los humanos. Por otro lado, la alta incidencia de casos de dengue se interrelaciona con el ambiente principalmente como consecuencia del cambio climático. Recientemente, debido a la continua presencia de desastres naturales, especialmente huracanes, se han reportado brotes importantes de casos de dengue en el país, por ejemplo, a principios del 2023 en Yucatán y en octubre 2023 en Acapulco, Guerrero por el paso del huracán Otis (Reporte, El Sur Acapulco, 2023). Además, el aumento considerable de lluvias por efectos climáticos como La Niña o el monzón mexicano (del árabe mausim, que significa estación; cambio estacional en la dirección de los vientos cálidos y húmedos del Pacífico y el Golfo de California que genera circulaciones monzónicas, principalmente en el Noroeste de México) ha provocado que incremente considerablemente el número de casos de dengue en el país, incluso en regiones donde normalmente no prevalece un clima apropiado para el desarrollo del mosquito vector, como en Jalisco, donde se han reportado plagas del mosquito vector por consecuencia de temperaturas más altas (lo que acelera el ciclo de vida de los mosquitos, aumentando su capacidad de reproducción y transmisión del virus), además de la presencia de lluvias intensas y prolongadas (lo que genera la acumulación de agua en zonas urbanas y rurales, creando más criaderos de mosquitos) (SSA, 2024).

¿Cómo se podría abordar este problema desde todos los sectores para ofrecer soluciones de manera integral? El dengue es un problema de salud pública de gran relevancia, por lo que requiere de una respuesta coordinada y multisectorial. Esto implica la participación activa de diversos sectores, tanto de la sociedad como gubernamentales, para abordar las múltiples dimensiones del problema. Algunas estrategias que podrían implementarse desde diferentes sectores abarcan, por ejemplo, la vigilancia epidemiológica, fortaleciendo los sistemas de vigilancia para detectar tempranamente brotes y monitorear la distribución geográfica de la enfermedad (SIVE, 2024; SSA, 2024). Así mismo, a través de dependencias gubernamentales, en zonas de alta incidencia, se podría garantizar el acceso a pruebas diagnósticas rápidas y precisas para confirmar casos y tomar medidas de control adecuadas, brindar atención médica de calidad a los pacientes con dengue, incluyendo hidratación, manejo de complicaciones y prevención de infecciones secundarias, además de diseñar y ejecutar campañas de educación para la salud dirigidas a la población en general, enfatizando la prevención y el control del DENV. En la parte ambiental, se podrían reforzar las campañas informativas para implementar medidas de control de la población de mosquitos

Aedes spp., como la eliminación de criaderos, la aplicación de larvicidas y la fumigación en áreas estratégicas, así como mejorar la gestión de residuos sólidos para evitar la acumulación de agua estancada, que representa un ambiente propicio para la reproducción de mosquitos, y promover prácticas de urbanismo que reduzcan la proliferación de mosquitos, como la construcción de drenajes adecuados y la planificación de espacios verdes (SIVE, 2024). El dengue se debe considerar como un tema prioritario, no sólo en Baja California Sur, sino en nuestro país y, de este modo, fomentar la investigación en nuevas herramientas y estrategias para el control del dengue, como el desarrollo de vacunas y larvicidas más eficientes.

¿Quiénes, desde el ámbito de su función y/o competencia, podrían contribuir en la solución? En este ejemplo, quizá la solución radica en la prevención y el control tanto del mosquito vector como del DENV. Para ello, es fundamental abordar el problema de manera integral, lo que requiere un esfuerzo conjunto de diversos sectores de la sociedad. Al ser el dengue una enfermedad que afecta a los humanos, la participación activa del sector salud, desde médicos familiares, epidemiólogos, personal de enfermería y de servicio social, pero también de la industria farmacéutica, es obvio e indispensable. A través del sector educativo, se puede incluir la educación sobre el dengue en los currículos escolares, fomentando hábitos saludables y el conocimiento sobre la prevención de la enfermedad, capacitar a los docentes para que puedan transmitir de manera efectiva los conocimientos sobre el dengue a sus estudiantes. Inclusive la comunidad científica, a través de actividades de divulgación, podemos involucrar a las comunidades en las actividades de prevención y control del dengue, y dando a conocer las diferentes estrategias que se han desarrollado para producir candidatos vacunales efectivos contra este virus.

Problema público 3: Contaminación

La palabra contaminación se refiere a la presencia de residuos no deseados, a menudo materiales peligrosos, liberados en el ambiente por la actividad humana, y que se asocian a alteraciones negativas a la salud del ambiente, de los animales y/o de los humanos (Donovan, 2001; Ramstorp, 2008) (Fig. 2). Los contaminantes pueden ser de origen natural y/o antropogénico; entre los primeros se pueden incluir algunos metales que se encuentran en depósitos naturales en sitios específicos alrededor del mundo, como el cadmio o cobre. Los contaminantes de origen antropogénico son aquellos que se derivan de las acciones de los humanos, principalmente asociadas a industrias como la minería, agropecuaria, artesanía, entre otros. Algunos contaminantes, como los plaguicidas o herbicidas, se desarrollaron para atender problemas específicos. Otros contaminantes, como las emisiones de la quema de hidrocarburos, se derivan del desarrollo urbano. En los últimos años se

ha manejado el término contaminantes emergentes para referirnos a materiales que existen desde hace mucho tiempo, como los plásticos, aparatos electrónicos y medicamentos, pero que apenas en la última década hemos empezado a darnos cuenta de que están asociados a disrupción de la salud de animales, humanos y el ambiente, siendo uno de los desafíos más grandes que enfrentan las sociedades modernas, especialmente en los países en desarrollo (Landrigan *et al.*, 2020). Los términos contaminación biológica y contaminantes biológicos han sido recientemente usados para referirse a la introducción, dispersión y efectos de las especies exóticas invasivas (Elliott, 2003; O'Neill, 2004).

¿Cómo el problema de contaminación se interrelaciona con la salud humana, animal, vegetal y ambiental? Los contaminantes, como por ejemplo los metales pesados, plaguicidas, productos farmacéuticos son sustancias químicas que pueden tener efectos dañinos en los seres vivos y el ambiente. La exposición a cualquiera de estos contaminantes puede iniciar un efecto en cadena que altera de manera negativa, bajo el enfoque de Una Salud, la salud de los seres humanos, los animales y los ecosistemas (Dinis-Oliveira, 2023).

En general, muchos contaminantes se perciben en el ambiente como basura que, además de dar un aspecto desagradable al paisaje, pueden constituir barreras físicas para el desarrollo de plantas, la alimentación de animales o disminuir la calidad del suelo y el agua en que se encuentran. Dependiendo del contaminante en cuestión, existen varias rutas de exposición para los seres vivos. Una vez en el ambiente, los contaminantes se integran a las plantas (a través de las raíces) y a los animales y humanos (a través de la respiración, a través de la piel y, con mayor frecuencia, a través del alimento). Con los productos de excreción de los animales y los humanos, los contaminantes en nuestro cuerpo regresan al ambiente creando un círculo de riesgo y afectación a la salud humana, animal, vegetal y ambiental. Los efectos nocivos a la salud de plantas, animales y humanos por la presencia de contaminantes como el mercurio se han estudiado extensivamente y han sido descritos en la literatura científica y médica, así como en los medios de comunicación masiva. Sin embargo, los efectos adversos debido a la exposición a contaminantes emergentes se están estudiando y en estos momentos solamente conocemos una fracción del daño que pueden llegar a ejercer (Brassea *et al.*, 2024).

La tragedia de Minamata en los años 1950s resalta la importancia de la aplicación del concepto de Una Salud en toxicología. Esta tragedia involucró la exposición al mercurio debido a desechos industriales que contenían metilmercurio vertidos en la bahía de Minamata. Comenzó con peces muertos y pescadores afectados, seguidos de aves y gatos que mostraban síntomas de

envenenamiento. Los niños comenzaron a presentar síntomas neurológicos (convulsiones, problemas para caminar y hablar). En 1959 se diagnosticó el síndrome como envenenamiento por metilmercurio. La fuente contaminante se identificó en 1961: una instalación de producción de cloro liberaba mercurio en la bahía, afectando a peces, gatos, aves y humanos, demostrando la conexión de Una Salud (Aguirre *et al.*, 2016).

Particularmente en Baja California Sur, en el estudio de Gaxiola-Robles *et al.* (2014) se detectaron niveles elevados de mercurio en el cabello de mujeres lactantes; el 72% (54 de 75) de las mujeres muestreadas tenían concentraciones de mercurio por encima del límite seguro establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) de 1 mg/kg, y el 8% (6 de 75) superando los 5 mg/kg (Hamade, 2014). En estudios de seguimiento, se observó que la frecuencia en el consumo de pescado era el factor que explicaba mejor el contenido de mercurio en el cabello del estudio de Gaxiola-Robles *et al.* (2014; Bentzen *et al.*, 2014). Un estudio más reciente con 70 mujeres lactantes de Baja California Sur reportó un menor contenido de mercurio en el cabello (Harley *et al.*, 2019) en comparación con los estudios previos. Sin embargo, Harley *et al.* (2019) reforzaron que el consumo de pescado es el factor principal que contribuye a explicar las concentraciones de mercurio observadas. Este es un claro ejemplo de cómo los contaminantes, como el mercurio, pueden biomagnificarse en los ecosistemas acuáticos y llegar a los seres humanos, estableciendo así, la conexión entre el ambiente acuático, la biota marina, y la población humana de Baja California Sur.

La Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible finalizó con la publicación del documento “Transformar Nuestro Mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” en el cual se establecen 17 objetivos económicos, sociales y ambientales. Entre ellos, el Objetivo 15 señala: Asegurar la conservación y el uso sostenible de los ecosistemas y sus servicios, detener la pérdida de biodiversidad, proteger las especies nativas amenazadas y evitar su extinción, adoptar medidas para prevenir la introducción de especies exóticas invasoras, reducir significativamente sus efectos y controlarlas o erradicarlas. Desafortunadamente, la dispersión de peces exóticos en ecosistemas acuáticos mexicanos se ha incrementado notablemente, con registros de 4 especies en el año de 1904, 94 especies en 1997 y 115 especies de peces exóticos en el 2008 (Contreras-Balderas *et al.*, 2008). La presencia de los peces africanos conocidos como “tilapias” es de gran preocupación para especialistas biólogos e ictiólogos nacionales y extranjeros, quienes han documentado que las tilapias son un tipo de contaminación biológica que afecta negativamente las comunidades de peces nativos y los ecosistemas acuáticos y por ello son consideradas entre las especies exóticas invasoras más dañinas del mundo (Comité Asesor Nacional sobre Especies Invasoras, 2010; Lowe

et al., 2004). Las tilapias son responsables de impactos severos como la homogenización biótica, eutrofización, competencia, depredación, pérdida de biodiversidad y dispersión de agentes patógenos (Contreras-Balderas y Escalante, 1984; Olden y Poff, 2003, 2005; Salgado-Maldonado y Rubio-Godoy, 2014). Sin embargo, grupos de la sociedad toman a las tilapias como un nuevo recurso alimenticio y comercial el cual hay que aprovechar y dispersarlo sin aplicar previamente el principio precautorio y discutir con profundidad los efectos ecológicos negativos que provocarán. Mientras la Carta Nacional Pesquera promueve la pesca de las tilapias (DOF, 2023), la Ley General de la Vida Silvestre (DOF, 2021) en su Artículo 27 Bis señala la prohibición de la liberación o introducción a los hábitats y ecosistemas naturales de especies exóticas invasoras.

La mayoría de las cuencas hidrológicas de Baja California Sur están contaminadas biológicamente por las tilapias las cuales afectan la supervivencia de especies nativas del estado. En el caso particular de la sardinilla peninsular de agua dulce *Fundulus lima*, especie endémica que se distribuye en la región de la cuenca del río Las Pocitas hasta el río Santo Domingo su situación poblacional es crítica con un estatus de especie en peligro de extinción, ya ha sido extirpada en cuatro cuencas importantes, San Javier, Bebelamas, San Luis, y Las Pocitas-San Hilario, todas ellas con presencia de tilapias. Las evidencias indican que tal condición se debe a procesos de exclusión competitiva provocadas por las tilapias ya que la densidad de *F. lima* se ha registrado con una correlación inversa significativa con la densidad del cíclido exótico *Tilapia cf. zillii* (Ruiz-Campos, 2000; Ruiz-Campos et al., 2006, 2012, 2014).

¿Cómo se podría abordar este problema desde todos los sectores para ofrecer soluciones de manera integral? Estar conscientes de que existen problemas de contaminación es la primera parte de la solución. Afortunadamente, los medios de comunicación masiva y la globalización han permitido conocer y reconocer que tenemos serios problemas de contaminación a nivel mundial al informar a la población sobre los posibles riesgos asociados con la exposición a productos químicos tóxicos y promover prácticas sostenibles que reduzcan la liberación de sustancias peligrosas y contaminantes químicos y biológicos al medio (Magurany et al., 2023). Por ello, ha sido relativamente fácil en casi todos los países adoptar medidas para el control de la contaminación; entre ellos, la separación de la basura (por lo menos en orgánica e inorgánica); reducir, reciclar y reusar todo tipo de materiales; reducir el uso de plásticos de un solo uso, y dar prioridad al uso de materiales orgánicos (algodón) sobre los sintéticos (nylon, poliéster). Recientemente, se ha propuesto un modelo de producción y consumo de tal manera que se reduzca al máximo el uso de los recursos naturales y se minimicen las consecuencias negativas a la salud ambiental, animal y humana; a este modelo se le conoce como economía circular y su objetivo es lograr la sostenibilidad

y el ahorro de recursos y fuentes de energía, promoviendo valores como el respeto, enfatizando el uso de los residuos como materia prima para generar otros bienes (Martín, 2024). Así mismo, bajo el enfoque de Una Salud se enfatiza la importancia de la investigación y la vigilancia continua (monitoreos) de los contaminantes químicos y biológicos en el ambiente. Por tal motivo, es imperativo que se lleven a cabo estudios epidemiológicos y toxicológicos para evaluar los efectos de las sustancias químicas en la salud humana y animal. Estos estudios proporcionan evidencia científica que respalda la toma de decisiones basada en la gestión de riesgos y la regulación de sustancias tóxicas (Dinis-Oliveira, 2023). Respecto a la contaminación biológica existe mucho por hacer, por ejemplo, una educación integral que incluya el concepto de Una Salud y socializar con mayor intensidad la necesidad de asegurar la conservación y el uso sostenible de los recursos, de los ecosistemas y sus servicios, detener la pérdida de biodiversidad, observar la normatividad ambiental y aplicar medidas a nivel estatal y municipal para prevenir nuevas introducciones de especies exóticas invasoras.

¿Quiénes, desde el ámbito de su función y/o competencia, podrían contribuir en la solución? La formación de profesionales de la salud y científicos en el campo de la toxicología y ecología bajo el enfoque de Una Salud es fundamental para abordar de manera efectiva los desafíos relacionados con los contaminantes químicos y biológicos. Esto implica promover la colaboración y la comunicación entre disciplinas, fomentando la investigación y desarrollando estrategias de gestión de riesgos (Buttke, 2011). También reconocer desde todos los sectores de la población que la solución al problema de la contaminación está en todos nosotros. Ha sido gracias a la participación de organizaciones de la sociedad civil no gubernamentales que hemos tomado conciencia, en todo el mundo, de la contaminación causada por los plásticos de un solo uso y que hemos empezado a dejar de usar popotes, bolsas de plástico y contenedores de unicel. Pero hay muchas más cosas que podemos hacer para disminuir la presencia de contaminantes en nuestro planeta. Los científicos podemos aumentar los esfuerzos para estudiar los efectos a la salud del ambiente, animales y humanos, no solamente de los materiales que se reconocen actualmente como contaminantes, sino de todos los nuevos productos y materiales. Las diversas industrias pueden buscar alternativas para la extracción de recursos naturales y la producción de los bienes y servicios que se apeguen a la economía circular con énfasis en Una Salud. Por ejemplo, la industria farmacéutica puede ofrecer la cantidad de medicamento exacta para cada tratamiento en vez de vender frascos o cajas con cantidades que, invariablemente, nos sobran y tiramos a la basura cuando cumplimos con el régimen indicado por el médico. Los gobiernos pueden invertir en (1) estrategias que incentiven la participación de las empresas en la producción de bienes y servicios inocuos a la salud ambiental,

animal y humana, (2) mecanismos que favorezcan el acopio y reciclamiento de todo tipo de materiales, y (3) la educación de los ciudadanos en las ventajas, desde el contexto de Una Salud, de reducir al mínimo la producción y el uso indiscriminado de sustancias contaminantes. Si cada uno de nosotros dejamos de comprar el nuevo modelo de celular, una pantalla de televisión más grande, la consola de juegos de moda sólo porque lo queremos y no porque de verdad lo necesitemos, contribuiremos a reducir la cantidad de contaminantes y a mantener la salud del ambiente, animales y humanos. Ecólogos, genetistas e ictiólogos han propuesto el establecimiento a corto plazo de programas de control y erradicación de peces exóticos, de monitoreo incorporando organismos acuáticos como indicadores de la salud ambiental, de recuperación de hábitats, con especial atención en los oasis sudcalifornianos, y de programas de conservación *ex situ* de aquellas especies en estatus de peligro de extinción vía la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS) y centros de investigación que cuentan con programas de acuicultura con la meta de proveer individuos para repoblación en aquellos sitios de su distribución histórica previamente restaurados y exentos de peces exóticos (Comité Asesor Nacional sobre Especies Invasoras, 2010; Ruiz-Campos *et al.*, 2006, 2012).

Perspectivas: propuesta general estratégica

El enfoque de Una Salud sugiere que el reconocimiento de la relación intrínseca y multidimensional entre la salud de los seres humanos, la salud de los animales y la salud de los ecosistemas es un primer paso para la solución sostenible de la mayoría de los problemas que nos aquejan en el siglo XXI, incluyendo el abasto de agua potable, energía, aire limpio, alimentos sanos y nutritivos. Este enfoque puede ofrecer a lugares como Baja California Sur la protección de la biodiversidad local a pesar de la existencia de los retos naturales (huracanes, cambio climático) y antropogénicos (urbanización, pesca, turismo) presentes en la región. El enfoque de Una Salud sugiere que el trabajo en conjunto es una herramienta indispensable para promover el bienestar de los animales, los seres humanos y los ecosistemas y, al mismo tiempo, contribuir al desarrollo sostenible. La información científica disponible nos dice que en casos como el de los microorganismos resistentes a los antibióticos, el dengue y la contaminación química y biológica, los problemas tienen causas múltiples; entre ellas, factores ambientales, sociales, económicos. Por lo tanto, para lograr una solución viable y duradera de cualquiera de estos problemas se requiere abordarlos desde múltiples disciplinas y con la participación de múltiples sectores. La participación activa de los gobiernos (a nivel local, nacional e internacional) que establezcan mecanismos, con presupuestos asignados,

por ejemplo, para vigilar y monitorizar la presencia de un patógeno RAM, los brotes de dengue o la concentración de mercurio en alimentos es una pieza clave, más no es la única. La búsqueda continua de información y conocimiento más detallado y su aplicación sobre, por ejemplo, compuestos activos en plantas con actividad antimicrobiana, los patrones de distribución del mosquito transmisor del DENV, la transmisión de mercurio a través de la cadena alimenticia, o herramientas genéticas para erradicar especies invasoras es otra pieza indispensable para la solución de problemas prioritarios. Pero se requiere también, entre muchos otros actores, de arquitectos que contribuyan a un desarrollo urbano organizado, planeado y controlado, de ingenieros que ayuden al diseño y construcción de drenajes adecuados, del sector educativo y de los medios de comunicación para llevar a cabo actividades de divulgación adecuados al contexto cultural de cada comunidad y, por supuesto, de la sociedad en general quienes, al final del día, viven los problemas y las consecuencias, tanto positivas como negativas, de las decisiones que se toman en cada sector.

Agradecimientos

Al CONAHCYT por el reconocimiento (No. 41) del Laboratorio Nacional de Generación de Vacunas Veterinarias y Servicios de Diagnóstico. Al Programa de Agricultura en Zonas Áridas (PAZA) y al Programa de Planeación Ambiental y Conservación (PLAYCO), en particular a los integrantes de los laboratorios de Inmunología y Vacunología, Estrés Oxidativo, Microalgas Nocivas y Carcinología, por su constante apoyo.

Referencias

- Aguirre, A. A., V.R. Beasley, T. Augspurger, W.H. Benson, J. Whaley, y N. Basu. 2016. One health- Transdisciplinary opportunities for SETAC leadership in integrating and improving the health of people, animals, and the environment. *Environmental Toxicology and Chemistry* 35(10): 2383–2391. <https://doi.org/10.1002/etc.3557>.
- Antimicrobial Resistance Collaborators. 2022. Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis. *The Lancet*. 399(10325), 629-655. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02724-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02724-0).

- Brassea-Pérez, E., R. Gaxiola-Robles, C.J. Hernández-Camacho, J.P. Vázquez-Medina, V. Labrada-Martagón, y T. Zenteno-Savín. 2024. Lo bueno, lo malo y lo muy malo de los plásticos. *Recursos Naturales y Sociedad*, 10(1): 73-83. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.01.0007>.
- Bentzen, R., J.M. Castellini, R. Gaxiola-Robles, T. Zenteno-Savín, L.C. Méndez-Rodríguez, & T. O'Hara. 2014. Relationship between self-reported fish and shellfish consumption, carbon and nitrogen stable isotope values and total mercury concentrations in pregnant women (II) from Baja California Sur, Mexico. *Toxicology Reports* 1: 1115–1122. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2014.09.014>.
- Buttke, D. E. 2011. Toxicology, Environmental Health, and the “One Health” Concept. *Journal of Medical Toxicology* 7(4): 329–332. <https://doi.org/10.1007/s13181-011-0172-4>.
- Cepeda-Palacios, R., I. Toledo-Gálvez, J.M. Ramírez-Orduña, C. Angulo, & A. Tejas-Romero. 2017. Environmental factors favoring the proliferation of *Aedes aegypti* 1 (Linnaeus 1762) larvae in livestock water troughs at a suburban area of La Paz, Mexico. *Southwestern Entomologist* 42(3): 795-803. <https://doi.org/10.3958/059.042.0318>.
- COFEPRIS. 2019. Cofepris, académicos de la UNAM, la OPS/OMS y líderes de opinión hacen llamado sobre el uso de antimicrobianos. Gobierno de México: Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. En: <https://www.gob.mx/cofepris/articulos/cofepris-academicos-de-la-unam-la-ops-oms-y-lideres-de-opinion-hacen-llamado-sobre-el-uso-de-antimicrobianos#:~:text=La%20resistencia%20a%20los%20antimicrobianos,los%20medicamentos%2C%20como%20los%20antibi%C3%B3ticos>. (consultado el 29/08/ 2024).
- Comité Asesor Nacional sobre Especies Invasoras. 2010. Estrategia nacional sobre especies invasoras en México, prevención, control y erradicación. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Protegidas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 91 pp.
- Contreras-Balderas, S. y M. A. Escalante. 1984. Distribution and known impacts of exotic fishes in Mexico. Pp. 102-130. En: Courtenay Jr. W. C. y J. R. Stauffer Jr. (Eds.). *Distribution, Biology, and Management of Exotic Fishes*. Johns Hopkins University Press, Baltimore. 430 pp.
- Dinis-Oliveira, R. J. 2023. No Boundaries for Toxicology in Clinical Medicine: One Health, One Society and One Planet for All of Us. *Journal of Clinical Medicine* 12(8): 2808. <https://doi.org/10.3390/jcm12082808>.

- Diéguez Fernández, L., S. M. Cabrera Fernández, y R. Rodríguez de la Vega. 2009. Infestación de *Aedes (St.) aegypti* en bebederos de animales en un área de salud. *Revista Cubana de Medicina Tropical* 61(1): 82-87. ISSN: 1561-3054.
- DOF. 2018. Estrategia Nacional de Acción contra la Resistencia a los Antimicrobianos. SEGOB: Diario Oficial de la Federación. En: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5525043&fecha=05/06/2018#gsc.tab=0. (consultado el 29/08/ 2024).
- DOF. 2021. Ley General de Vida Silvestre. Presidencia de la República. Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada del 20/05/2021.
- DOF. 2023. Carta Nacional Pesquera. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Diario Oficial de la Federación del 21/07/2023. Ciudad de México.
- Donovan, R.P. 2001 Contamination-free manufacturing for semiconductors and other precision products. CRC Press. pp. 1-3. ISBN 9780824703806.
- El Sur Acapulco. 2023. Suman 3 mil 898 casos y nueve defunciones por dengue en Guerrero en este año, reporte el SSA. El Sur de Acapulco. En: <https://suracapulco.mx/suman-3-mil-898-casos-y-nueve-defunciones-por-dengue-en-guerrero-en-este-ano-reporta-la-ssa/>. (consultado el 11/10/ 2024).
- Elliott, M. 2003. Biological pollutants and biological pollution: an increasing cause for concern. *Marine Pollution Bulletin* 46: 275–280.
- FAO. 2022. Antimicrobial Use and Resistance in Plant Agriculture: A One Health Perspective. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. En: <https://openknowledge.fao.org/items/2722ce56-353d-4948-9edc-725333fc9b1d>. (consultado el 11/10/ 2024).
- FAO. 2024. Resistencia a los antimicrobianos. Organización de las Naciones Unidas. En: <https://www.fao.org/antimicrobial-resistance/es/>. (consultado el 20/08/ 2024).
- Gaxiola-Robles, R., R. Bentzen, T. Zenteno-Savín, V. Labrada-Martagón, J.M. Castellini, A. Celis, T. O´Hara, & L.C. Méndez-Rodríguez. 2014. Marine diet and tobacco exposure affects mercury concentrations in pregnant women (I) from Baja California Sur, Mexico. *Toxicology Reports* 1: 1123–1132. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2014.10.005>.
- Guerra-Contreras, K. 2021. Caracterización de bacterias aisladas de zonas costeras como agentes de control biológico del cáncer bacteriano causado por *Clavibacter michiganensis* subsp.



- michiganensis en tomate. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.. Repositorio. Tesis de Maestria. En: https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/2801/3/guerra_k%20TESIS.pdf. (consultado el 20/08/ 2024).
- Hamade, A. K. 2014. Fish Consumption Advice for Alaskans: A Risk Management Strategy to Optimize the Public's Health. State of Alaska Epidemiology. En: http://www.epi.hss.state.ak.us/bulletins/docs/rr2007_04.pdf. (consultado el 11/10/ 2024).
- Harley, J., R. Gaxiola-Robles, T. Zenteno-Savín, L.C. Méndez-Rodríguez, A.E. Bencomo-Alvarez, A. Thiede, & O´Hara, T. 2019. Using carbon and nitrogen stable isotope modelling to assess dietary mercury exposure for pregnant women in Baja California Sur, Mexico. Chemosphere 234: 702–714. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.070>.
- INSABI. 2023. Cursos Virtuales. Gobierno de México: SiESABI. En: <https://educacion.imssbienestar.gob.mx/siesabi-aulavirtual/course/index.php?categoryid=24&browse=courses&perpage=10&page=1>. (consultado el 29/08/ 2024).
- IMSS. 2024. Estrategia Institucional Contra La Resistencia a Los Antimicrobianos. Gobierno de México: Instituto Mexicano del Seguro Social. En: https://educacionensalud.imss.gob.mx/ces_wp/resistencia-a-los-antimicrobianos/. (consultado el 29/08/ 2024).
- Landrigan, P. J., J.J. Stegeman, L.E. Fleming, D. Allemand, D.M. Anderson, L.C. Backer, F. Brucker-Davis, N. Chevalier, L. Corra, D. Czerucka, M.Y.D. Bottein, B. Demeneix, M. Depledge, D.D. Deheyn, & C.J. Dorman. 2020. Human health and ocean pollution. Annals of Global Health 86(1): 151. <https://doi.org/10.5334/aogh.2831>.
- Lowe S., M. Browne, S. Boudjelas, M. De Poorter. 2004. 100 de las Especies Exóticas Invasoras más dañinas del mundo. Una selección del Global Invasive Species Database. Grupo Especialista de Especies Invasoras (GEEI), Comisión de Supervivencia de Especies (CSE) de la Unión Mundial para la Naturaleza (UICN), Hollands Printing Ltd, Auckland, Nueva Zelanda. 12 pp. [www.issg.org/ bookletS.pdf](http://www.issg.org/bookletS.pdf).
- Magurany, K. A., X. Chang, R. Clewell, S. Coecke, E. Haugabrooks, & S. Marty. 2023. A pragmatic framework for the application of new approach methodologies in one health toxicological risk assessment. Toxicological Sciences 192(2): 155–177. doi: <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfad012>.

- Martín, A. 2024. Economía circular: Qué es, cómo funciona, importancia y ventajas ¡ejemplos! OVACEN. En: <https://ovacen.com/economia-circular/>. (consultado el 18/08/ 2023).
- Mendoza-Montijo, L.M., A. Murillo-Cisneros, R. Gaxiola-Robles, C. Angulo, O. Lugo-Lugo, T. Zenteno-Savín. 2023. One Health, Una Salud. Recursos Naturales y Sociedad 9(3): 17-30. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2023.09.09.03.0003>.
- OHHLEP. 2021. Declaración conjunta del grupo tripartito (FAO, OIE, OMS) y el PNUMA. Organización Mundial de La Salud. En: <https://www.who.int/es/news/item/01-12-2021-tripartite-and-unep-support-ohhlep-s-definition-of-one-health>. (consultado el 11/10/ 2024).
- Olden, J. D. y N. L. Poff. 2003. Toward a Mechanistic Understanding and Prediction of Biotic Homogenization. The American Naturalist 162 (4): 75-89.
- Olden, J. D. y N. L. Poff. 2005. Long-term trends of native and non-native fish faunas in the American Southwest. Animal Biodiversity and Conservation 28 (1): 75-89.
- OMS. 2021. Resistencia a los antimicrobianos. Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance#:~:text=La%20OMS%20ha%20declarado%20que,la%20aparici%C3%B3n%20de%20pat%C3%B3genos%20farmacorresistentes>. (consultado el 29/08/ 2024).
- O'Neill, C.R. 2004. Biological pollution of the Great Lakes: the nonindigenous aquatic species invasion of North America's freshwater seas. New York Sea Grant Information Bulletin. Brockport, NY. 68 pp.
- Ramstorp, M. 2008. Introduction to Contamination Control and Cleanroom Technology. John Wiley & Sons. pp. 20-26. ISBN 9783527613137.
- Reyes-Becerril, M., F. Ruvalcaba, V. Sanchez, M.G. López, J. Silva-Jara, L. Hernandez-Adame, & C. Angulo. 2021. Green synthesis of gold nanoparticles using *Turnera diffusa* Willd enhanced antimicrobial properties and immune response in Longfin yellowtail leukocytes. Aquaculture Research 52(7): 3391-3402. <https://doi.org/10.1111/are.15184>.
- Rodríguez-Valdez, G.R. 2017. Actividad antimicrobiana e inmunoestimulante de bacterias aisladas de ambientes marinos extremos en Baja California Sur. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.. Repositorio. Tesis de Maestría. En: http://dspace.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/588/rodriguez_g.pdf?sequence=1&isAllowed=y. (consultado el 20/08/ 2024).

- Ruiz-Campos, G. 2000. Threatened fishes of the world: *Fundulus lima* Vaillant, 1894 (*Fundulidae*). Environmental Biology of Fishes 59: 20.
- Ruiz-Campos, G., F. Camarena-Rosales, S. Contreras-Balderas, C.A. Reyes-Valdez, J. De La Cruz-Agüero y E. Torres-Balcazar. 2006. Distribution and abundance of the endangered killifish, *Fundulus lima* (Telostei: Fundulidae), in oases of central Baja California peninsula, México. The Southwestern Naturalist 51: 502-509.
- Ruiz-Campos, G., S. Contreras-Balderas, A. Andreu-Soler, A. Varela-Romero y E. Campos. 2012. An annotated distributional checklist of exotic freshwater fishes from the Baja California Peninsula, Mexico. Revista Mexicana de Biodiversidad, 83: 216-234.
- Ruiz-Campos, G., A. Varela-Romero, S. Sánchez-Gonzales, F. Camarena-Rosales, A.M. Maeda-Martínez, A. F. González-Acosta, A. Andreu-Soler, E. Campos-González y J. Delgadillo-Rodríguez. 2014. Peces invasores en el noroeste de México. Pp. 375-399. En Mendoza, R. y P. Koleff (Eds.), Especies acuáticas invasoras en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. ISBN 978-607-8328-04-8.
- SADER, 2023. Carta Nacional Pesquera. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Diario Oficial de la Federación, 21 julio 2023, Ciudad de México.
- Salgado-Maldonado, G. y M. Rubio-Godoy. 2014. Helminthos parásitos de peces de agua dulce introducidos. Pp. 269-285. En: Mendoza, R. y P. Koleff (Coordinadores). Especies acuáticas invasoras en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 555 pp.
- SENASICA. 2023. Plan Estratégico Contra La Resistencia A Los Antimicrobianos (RAM). Servicio Nacional De Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Agricultura: Senasica. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/847156/Plan_Estrategico_RAM_VF.pdf. (consultado el 20/08/ 2024).
- SENASICA. 2024. Estrategia Nacional contra la Resistencia a los Antimicrobianos (RAM). Servicio Nacional De Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Agricultura: Senasica. En: <https://www.gob.mx/senasica/acciones-y-programas/resistencia-a-los-antimicrobianos-ram->. (consultado el 29/08/ 2024).
- SIVE. 2024. Epidemiología: Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica SIVE. Gobierno de México: Secretaria de Salud. En: <https://www.gob.mx/senasica/acciones-y-programas/sistema-nacional-de-vigilancia-epidemiologica-sive>. (consultado el 11/10/ 2024).

- SSA. 2023. Resistencia a los antimicrobianos. Gobierno de México: Secretaria de Salud. En: <https://www.salud.cdmx.gob.mx/conoce-mas/resistencia-losantimicrobianos#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20la%20Resistencia%20Antimicrobiana,mecanismos%2C%20cada%20vez%20m%C3%A1s%20complejos>. (consultado el 29/08/ 2024).
- SSA. 2024. Secretaría de Salud hace un llamado a la prevención para combatir el dengue en México. Gobierno de México: Secretaria de Salud. En: <https://www.gob.mx/salud/prensa/279-secretaria-de-salud-hace-un-llamado-a-la-prevencion-para-combatir-el-dengue-en-mexico>. (consultado el 11/10/ 2024).
- UNEP. 2024. Antimicrobial resistance: a global threat. UNO Environment Programme. En: <https://www.unep.org/topics/chemicals-and-pollution-action/pollution-and-health/antimicrobial-resistance-global-threat>. (consultado el 20/08/ 2024).
- Vicente-Santos, A., A. Moreira-Soto, C. Soto-Garita, L.G. Chaverri, A. Chaves, J.F. Drexler, J.A., Morales, A. Alfaro-Alarcón, B. Rodríguez-Herrera & E. Corrales-Aguilar. 2017. Neotropical bats that co-habit with humans function as dead-end hosts for dengue virus. *PLoS neglected tropical diseases* 11(5), e0005537. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0005537>.
- WHO. 1978. WHO called to return to the Declaration of Alma-Ata International conference on primary health care. World Health Organization. En: <https://www.who.int/teams/social-determinants-of-health/declaration-of-alma-ata>. (consultado el 11/10/ 2024).
- WHO. 2021. Resistencia a los antimicrobianos. World Health Organization. En: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance>. (consultado el 20/08/ 2024).
- WHO. 2024. One Health. World Health Organization. En: https://www.who.int/health-topics/one-health#tab=tab_1. (consultado el 11/10/ 2024).
- WOAH. 2024. Resistencia a los antimicrobianos. Organización Mundial de Sanidad Animal. En: <https://www.woah.org/es/que-hacemos/iniciativas-mundiales/resistencia-a-los-antimicrobianos/>. (consultado el 20/08/ 2024).
- Zunino, P. 2018. Historia y perspectivas del enfoque “Una Salud”. *Veterinaria (Montevideo)* 54(210): 46-51. <https://doi.org/10.29155/VET.54.210.8>.

Cita

Angulo C., Murillo-Cisneros D.A., Monreal-Escalante E., Maeda-Martínez A.M., Gaxiola-Robles R., León-Montoya H. y Zenteno-Savín T. Una Salud en Baja California Sur: Reflexiones y propuesta estratégica. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (1): 44-71. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0004>

Sometido: 23 de octubre de 2024

Aceptado: 17 de diciembre de 2024

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editora asociada: Dra. Vanessa Labrada Martagón

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

Applied conservation genetics:
The case of the peninsular pronghorn

La genética de la conservación aplicada: el caso de berrendo peninsular

Anastasia Klimova¹ y Jesús Neftalí Gutiérrez Rivera¹

Resumen

Las especies en peligro de extinción son susceptibles a la erosión genética, lo cual puede ser perjudicial a corto plazo debido a la endogamia y a largo plazo a causa de la reducción del potencial evolutivo. Por lo tanto, el seguimiento y la mitigación de la pérdida de diversidad genética son esenciales para la conservación de estas especies. El berrendo peninsular (*Antilocapra americana peninsularis*) es una subespecie de berrendo en peligro de extinción que se encuentra por completo en cautiverio. El número de individuos en cautiverio ha aumentado de 25 fundadores en 1998 a aproximadamente 600 individuos en la actualidad. En el presente trabajo se resumen los hallazgos científicos que abarcan trabajos de genética de conservación de berrendo y da a conocer el estatus genético de berrendo y su significancia. El berrendo peninsular presenta niveles bajos de la diversidad genética, con los resultados que sugieren que la población es propensa a la endogamia. Además, los índices de la diversidad para la subespecie peninsular son más bajos en comparación con otras subespecies. El tiempo en cautiverio resultó en una disminución en la heterocigosidad y un aumento en la proporción de individuos consanguíneos. Sin embargo, estas tendencias han sido parcialmente mitigadas por un intento de manejo reproductivo informado genéticamente implementado en 2018. La historia demográfica del berrendo peninsular, reveló dos eventos de disminución poblacional, aparentemente vinculadas a la desertificación de la Península de Baja California hace unos 6,000 años y las actividades humanas más recientes (menos de 500 años). Los estudios de diferenciación genética sugieren que el berrendo peninsular es distinto de las subespecies sonoreense y americana, lo que indica ausencia de flujo genético histórico y reciente a pesar de su proximidad geográfica.

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Km. 1 Carretera a San Juan de La Costa "El Comitán" La Paz, Baja California Sur. C.P. 23205, México.

* Autor de correspondencia: E-mail: anastasia_aleksandrovna@hotmail.com



Los resultados proporcionan información valiosa sobre la diversidad genética de esta subespecie en peligro de extinción e indican la importancia de un manejo genético informado para lograr resultados positivos de conservación.

Palabras clave

Antilocapra americana, genética de la conservación, especies en peligro de extinción, área natural protegida, desierto de Sonora.

Abstract

Endangered species are susceptible to genetic erosion, which can be detrimental in the short term due to inbreeding and in the long term due to reduced evolutionary potential. Therefore, monitoring and mitigating the loss of genetic diversity is essential for conserving such species. The peninsular pronghorn (*Antilocapra americana peninsularis*) is an endangered pronghorn subspecies maintained entirely in captivity. The number of animals in captivity has increased from 25 founders in 1998 to about 600 individuals today. This work summarizes the scientific findings encompassing population genetics works on pronghorn conservation, reveals the genetic status of pronghorn, and highlights its significance. Peninsular pronghorn has low levels of genetic diversity, suggesting that the population is prone to inbreeding. Furthermore, indices of diversity for the Peninsular subspecies appear to be lower than in other pronghorn subspecies. Time in captivity resulted in a decrease in heterozygosity and an increase in the proportion of inbred individuals. However, a genetically informed breeding management attempt implemented in 2018 has partially mitigated these trends. The demographic history of the Peninsular pronghorn revealed two events of population decline, apparently linked to desertification of the Baja California Peninsula about 6,000 years ago and to illegal hunting, habitat loss, and competition with domestic animals about 500 years ago. Genetic differentiation studies indicate that the Peninsular pronghorn is distinct from the Sonoran and American subspecies, pointing to the absence of historical and recent gene flow despite their geographic proximity. The results provide valuable information on the genetic diversity of this endangered subspecies and indicate the importance of informed genetic management to achieve positive conservation outcomes.

Keywords

Antilocapra americana, conservation genetics, endangered species, natural protected area, Sonoran Desert.

Antecedentes

¿Has oído hablar alguna vez del berrendo? Uno de los mamíferos más rápidos de la Tierra y el animal terrestre más veloz de Norteamérica, capaz de detectar movimiento a una distancia de más de 6 km gracias a su campo de visión de 300 grados (Imagen 1).



Imagen 1. Fotografía de berrendo peninsular (*Antilocapra americana peninsularis*) cautivo dentro de un corral en la Reserva de Biosfera de Vizcaíno (Tomada por Klimova A.).

Muchas personas, incluso estudiantes de biología, ni siquiera han oído hablar de él o lo confunden con el borrego cimarrón. Sin embargo, esto resulta sorprendente porque el berrendo no es una pequeña hierba efímera ni un raro insecto endémico; es un ungulado de tamaño mediano de Norteamérica y uno de los pocos mamíferos grandes de la península de Baja California (Krausman y Byers, 1998; O’Gara *et al.*, 2004). Otra pregunta que suele dejar a la gente perpleja y luego sorprendida por la respuesta, es ¿Cuál es el pariente más cercano del berrendo? (Imagen 2). Según la imagen, las personas hacen sus conjeturas: cabra, ciervo o antílope; sin embargo, rara vez se obtiene la respuesta correcta: los parientes más cercanos al berrendo son el okapi y la jirafa, especies que solo se encuentran en África (Zurano *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2019).



Imagen 2. Fotografía de un grupo de hembras de berrendo peninsular dentro de un corral en la Reserva de Biosfera de Vizcaíno (Tomada por Klimova A.).

Resulta que el berrendo (*Antilocapra americana*) es una familia monotípica que sólo se encuentra en América del Norte, con una única especie existente de la familia *Antilocapridae* (O’Gara et al., 2004). Varios parientes del berrendo vagaban por América del Norte durante Mioceno tardío y Plioceno (hace 6 a 2 millones de años atrás), pero todos perecieron por causas desconocidas (Heffelfinger et al., 2004). Actualmente, el berrendo se encuentra únicamente en el sur de Canadá, Estados Unidos y el norte de México. Aunque se reconocen cuatro subespecies, su estatus taxonómico ha sido objeto de debate. Una subespecie (*Antilocapra americana americana*) está restringida al sur de Canadá y una parte considerable de Estados Unidos; otra se encuentra en los Estados de Chihuahua y Coahuila en México (*A. americana mexicana*); una más habita el sur de Arizona y norte de Sonora (*A. americana sonoriensis*); y finalmente, una subespecie endémica (*A. americana peninsularis*) se encuentra sólo en la península de Baja California (Lee et al., 1994; O’Gara et al., 2004; Stephen et al., 2005).

Como especie, el berrendo casi siguió el camino de sus parientes. Se cree que, antes de la llegada de los colonizadores europeos, existían más de 35 millones de berrendos en América del Norte. En contraste, a principios del siglo XX, quedaban menos de 20,000 en toda su área de distribución

(O’Gara *et al.*, 2004). Esta drástica disminución poblacional fue el resultado de la caza excesiva, la destrucción del hábitat y la competencia con el ganado. Se estima que el berrendo ha perdido más del 70% de su hábitat natural, y algunas subespecies (e.g., berrendo peninsular y sonorense) han perdido alrededor del 90% de su hábitat (Cancino *et al.*, 1998; Laliberte y Ripple, 2004; Bean *et al.*, 2023).

Las medidas de conservación adoptadas en los EE. UU. y Canadá han contribuido a la recuperación del berrendo, con un número estimado actual de alrededor de 800,000 individuos adultos. La especie se considera segura en estos países y se maneja en consecuencia. Sin embargo, la recuperación fue bastante diferente para las subespecies que se encuentran en México, y no fue particularmente buena para el berrendo peninsular, la subespecie que habitaba las tierras bajas de la península de Baja California. La población de berrendos en esta región disminuyó, y para las décadas de 1980 y 1990 se registraban menos de 200 individuos.

Para evitar la extinción inminente del berrendo peninsular, se tomaron medidas drásticas de conservación, y en 1998 se inició un programa de cría en cautiverio en la Reserva de la Biosfera El Vizcaíno. Durante los primeros seis años del programa, se capturaron 25 animales adultos y juveniles para criarlos en cautiverio. A partir de ese momento, comenzó un periodo de protección para el berrendo peninsular, y el número de individuos aumentó anualmente, alcanzando aproximadamente 600 en la actualidad (Cancino *et al.*, 2005; SEMARNAT, 2009; Sánchez *et al.*, 2020). Hoy en día, el Programa de Recuperación del Berrendo Peninsular continúa ayudando a la especie a recuperarse en la Reserva de la Biosfera El Vizcaíno y en el Área de Protección de Flora y Fauna Valle de Los Cirios.

Sin embargo, el berrendo peninsular no es la única especie en peligro de extinción, en los últimos 500 años, la humanidad ha desencadenado una ola de extinciones de poblaciones naturales de plantas y animales (Dirzo *et al.*, 2014). Lo que ha convertido a la genética de la conservación en una herramienta indispensable que ayuda a determinar el contexto evolutivo en el proceso de la extinción de las especies y permite el desarrollo de mejores estrategias de manejo y recuperación de las mismas (Willi *et al.*, 2021). El presente trabajo busca divulgar la importancia de la genética en manejo y conservación de las especies en peligro, así como, explicar cómo los métodos de la genética de la conservación han ayudado en el manejo y la toma de decisiones sobre conservación de berrendo peninsular.

¿Por qué es importante la diversidad genética?

La diversidad genética es la variación en el ADN (genes) entre individuos de una especie. Es la base de la diversidad biológica y es de suma importancia tanto para los individuos como para las poblaciones y las especies en su conjunto (Frankham *et al.*, 2010). En primer lugar, la diversidad genética es esencial para que las poblaciones puedan evolucionar y adaptarse a los cambios ambientales. La pérdida de diversidad genética está estrechamente relacionada con la endogamia (reproducción entre individuos emparentados) y con una reducción en la capacidad de reproducción y supervivencia de las especies. Además, la diversidad genética contribuye a la diversidad de los ecosistemas, ya que provee la base para la diversidad de especies, contribuye a la resiliencia de los ecosistemas y evolución de especies nuevas (Vellend y Geber, 2005; Frankham *et al.*, 2010). La diversidad genética se puede medir utilizando marcadores genéticos, y se pueden estimar y comparar diversas métricas que reflejan los niveles de diversidad entre individuos y poblaciones, tales como el número de alelos, la heterocigosidad, el tamaño efectivo de la población, la diversidad de nucleótidos, entre otros. En general, las especies en peligro de extinción tienden a mostrar niveles más bajos de diversidad genética en comparación con las especies más ampliamente distribuidas (Allendorf y Luikart, 2013; Frankham *et al.*, 2010).

Dada la importancia de la diversidad genética, es de suma importancia conocer sus niveles en especies como el berrendo, así como entender como la historia demográfica y el tiempo bajo manejo en cautiverio la han afectado. En el caso del berrendo peninsular, se desconocen los niveles de diversidad genética de las poblaciones silvestres, ya que nunca se tomaron las muestras y ya no existen animales en su estado natural. Sin embargo, el Programa de Recuperación del Berrendo Peninsular no solo ha ayudado al berrendo peninsular a persistir y recuperarse en la Reserva de la Biosfera El Vizcaíno y en el Área de Protección de Flora y Fauna Valle de Los Cirios, también impulsó investigación científica que ha sido crucial en manejo y conservación del berrendo. Algunas de las preguntas requerían atención inmediata, como los requisitos dietéticos o las enfermedades infecciosas. Sin embargo, otras, aunque de suma importancia, han sido mayormente ignoradas debido a la falta de recursos, tiempo y expertos. Las preguntas más importantes son las siguientes:

- ¿Es el berrendo peninsular una subespecie (grupo genético) diferente de otras subespecies?
- ¿Cuáles son los niveles de diversidad genética del berrendo peninsular y cómo se comparan con los de otras subespecies?
- ¿Alcanza la población de berrendos actual la regla de tamaño 50/500?

- ¿Cómo ha afectado el tiempo en cautiverio a la composición genética del berrendo?
- ¿Cuáles fueron las fuerzas (naturales y/o antropogénicas) que contribuyeron al bajo tamaño poblacional y a la composición genética del berrendo peninsular?

Esas preguntas tienen implicaciones importantes para el manejo y la conservación del berrendo peninsular, y se han realizado investigaciones para responderlas y ayudar al berrendo a prosperar.

Diversidad genética en la población de berrendo peninsular: niveles y causas

El primer análisis de la diversidad genética de la población de berrendo peninsular en cautiverio se realizó en 2014, y la diversidad se comparó con la de otra subespecie de berrendo cautiva, el berrendo de Sonora (Klimova *et al.*, 2014). El berrendo de Sonora (*Antilocapra americana sonoriensis*) es una subespecie en peligro de extinción, distribuida en Sonora, México, y el sur de Arizona, EE. UU. Aunque el número de individuos de la subespecie de Sonora es mayor en comparación con la subespecie peninsular, sigue siendo relativamente bajo (~1,000 individuos silvestres). También se están llevando a cabo esfuerzos de cría en cautiverio y reintroducción de la subespecie de Sonora en EE. UU. (Hahn y Culver, 2021). Los niveles de diversidad genética fueron casi dos veces menores (p.ej., número de haplotipos 2 vs. 4 y la heterocigosidad observada 0.36 vs. 0.49) para el berrendo peninsular en comparación con la subespecie de Sonora (Klimova *et al.*, 2014). Posteriormente, se realizó la comparación entre la subespecie americana (*Antilocapra americana americana*, la subespecie más abundante), los berrendos sonorenses y peninsulares, encontrando nuevamente índices extremadamente bajos para el berrendo peninsular. Por ejemplo, la riqueza de alelos para la subespecie americana fue de 6, mientras que para los berrendos peninsulares fue solo de 2.7 (Hahn *et al.*, 2020).

Además, se detectó un exceso de individuos homocigotos en la subespecie peninsular, lo que indica la presencia de endogamia dentro de la población cautiva. Otra medida interesante de diversidad es el tamaño efectivo de la población (N_e), que representa el número de individuos que contribuyen a la siguiente generación. Se sugiere que un N_e de al menos 50 es necesario evitar la endogamia, y un $N_e=500$ es necesario para que la población mantenga su potencial evolutivo. Estos valores se conocen como la regla 50/500, una medida importante de la diversidad genética para especies en peligro (Frankham *et al.*, 2014; Cloudsley-Thompson *et al.*, 1981; Jamieson y Allendorf, 2012). Para el berrendo peninsular, el N_e se estimó entre 6.1 y 23.5 individuos, dependiendo de la metodología utilizada. En la subespecie de Sonora, el número de individuos fue de 15.6 a 100.4 (Klimova *et al.*, 2014). Estos resultados sugieren que ambas subespecies son propensas a la endogamia y que sus

números son insuficientes para mantener el potencial evolutivo y poder adaptarse a los cambios ambientales.

Los niveles de diversidad genética del berrendo peninsular en cautiverio son extremadamente bajos, incluso en comparación con otras subespecies en peligro de extinción. Esto lleva a preguntarse: ¿Por qué son tan bajos? ¿Fueron estos niveles el resultado de un colapso poblacional reciente debido a actividades antropogénicas, o la pérdida de diversidad es relacionada con la aridificación y el cambio de vegetación que sufrió la península de Baja California hace miles de años?

Para abordar esta cuestión, se utilizó el enfoque de cálculo bayesiano aproximado, que permitió establecer hipótesis sobre la demografía pasada del berrendo (Klimova *et al.*, 2022). Este enfoque propone modelos de cambio en el tamaño efectivo de la población a través del tiempo (por ejemplo, un modelo de cuello de botella, un modelo de reducción poblacional o un modelo de expansión). Los datos genéticos reales se comparan con los datos generados bajo cada modelo y se estima la probabilidad para cada uno de los modelos (Cornuet *et al.*, 2008). El enfoque de cálculo bayesiano aproximado permite estimar los valores de tamaño efectivo, así como los tiempos de eventos demográficos con sus respectivos valores de intervalos de confianza.

Los modelos demográficos para el berrendo peninsular, basados en la historia natural de la especie, incluyeron: un modelo nulo (en el que el número de individuos no cambió), un modelo de reducción reciente (en el que el número de individuos disminuyó en el pasado cercano, en los últimos cientos de años), un modelo de reducción antigua (en el que la reducción ocurrió hace miles de años) y un modelo de reducción en dos pasos (que contempla dos eventos de reducción poblacional en diferentes períodos de tiempo).

El mejor modelo, basado en los datos, mostró una reducción en dos pasos: primero, la población pasó de aproximadamente 40,000 individuos a 6,600, y luego a un N_e actual de ~200 individuos (Klimova *et al.*, 2022). Curiosamente, la primera reducción ocurrió hace unos seis mil años, coincidiendo con la aridificación postglacial de la península de Baja California. La segunda reducción, de aproximadamente 500 años atrás, podría estar relacionada con la colonización de la península e introducción de ganado.

El siguiente paso fue determinar cómo los eventos más recientes, como el manejo en cautiverio, han afectado a la composición genética del berrendo peninsular y si el aumento en el número de individuos ha mitigado la pérdida de diversidad genética. Los niveles de diversidad genética fueron

estimados y comparados para la población peninsular en cautiverio durante 2009, 2012, 2016, 2018 y 2021 (Klimova *et al.*, 2022). Durante este periodo, la diversidad genética del berrendo peninsular se redujo aproximadamente en un 20%, la heterocigosidad disminuyó y los niveles de endogamia aumentaron. El cambio en los niveles de endogamia se explicó por la pérdida de individuos con bajos niveles de endogamia y un aumento de individuos con endogamia moderada y alta (Figura 1). Estos resultados no son alentadores. Sin embargo, se observó que los niveles de diversidad se mantuvieron constantes entre 2018 y 2021, sin reducción adicional en la diversidad. Esto se atribuye al esfuerzo por incluir la estimación del parentesco genético en el manejo de los individuos y evitar la cruce de individuos altamente relacionados (Klimova *et al.*, 2022). El manejo genético de las poblaciones cautivas puede prevenir la pérdida de diversidad genética y ayudar a reducir la endogamia (Humble *et al.*, 2023). Por lo tanto, es importante incluir estas prácticas en el plan de manejo de cualquier especie bajo crianza intensiva en cautiverio, ya que puede mitigar la pérdida de la diversidad.

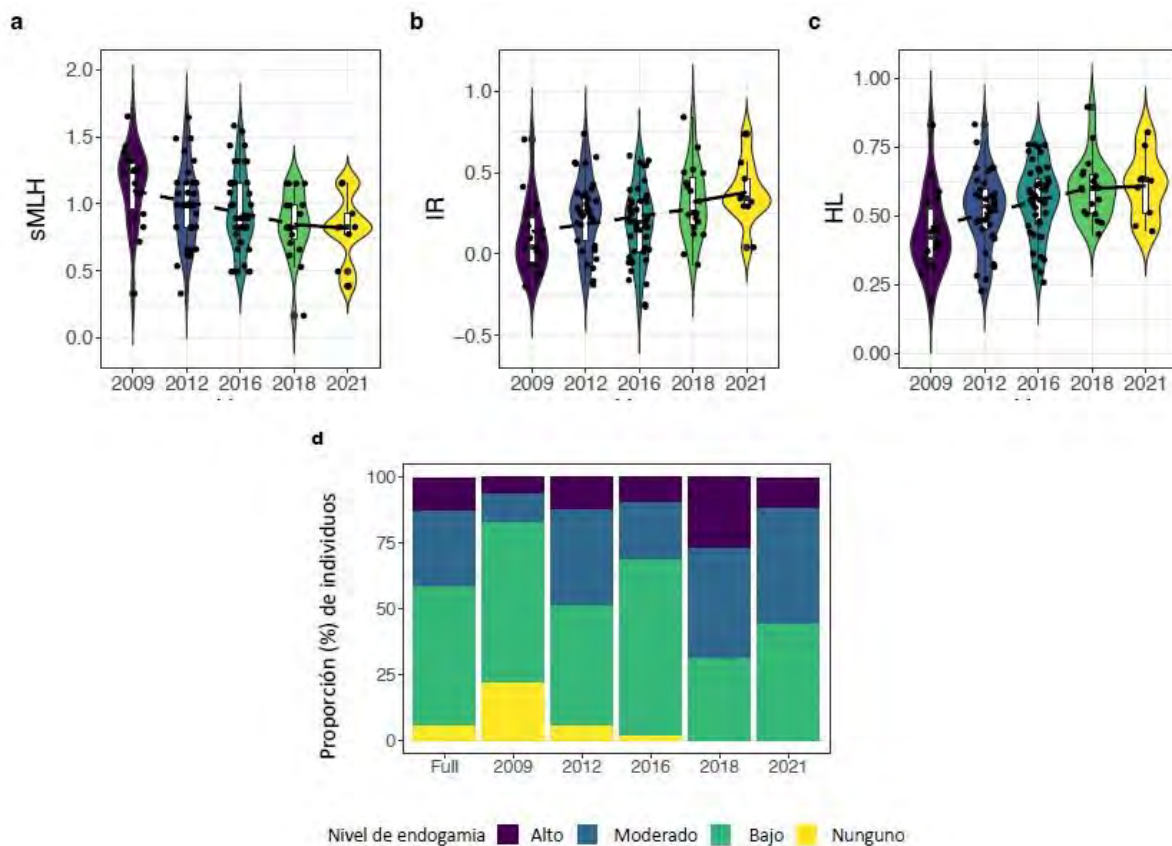


Figura 1. Gráficos que muestran los cambios temporales en los niveles de diversidad genética, estimada como heterocigosidad y endogamia. Los paneles (a–c) muestran los cambios en tres medidas de heterocigosidad individual: heterocigosidad multilocus estandarizada (sMLH), parentesco interno (IR) y homocigosidad ponderada por locus (HL), respectivamente. El panel (d) muestra gráficos de barras que representan la proporción (%) de individuos que pertenecen a diferentes clases de endogamia, desde ninguna ($f = 0$), niveles bajos ($f < 0,125$) y moderados ($0,125 < f < 0,25$) hasta niveles altos ($f > 0,25$) de endogamia. Modificado de Klimova *et al.* (2022).

La diversidad genética del berrendo peninsular es el resultado de una combinación de factores naturales (como el cambio climático y la disponibilidad de forraje) y factores humanos (como la falta de protección, la caza excesiva y las decisiones de manejo). Los niveles de diversidad y endogamia pueden verse afectados de manera negativa (reducción) por las decisiones de manejo inadecuadas, o de manera positiva (aumento o mantenimiento de la diversidad genética) si el manejo se basa en datos genéticos y poblacionales.

Diferenciación genética y distribución histórica

Una vez que se determina que la diversidad genética de una especie es baja, se pueden tomar diferentes acciones de manejo. Por ejemplo, se pueden incluir en la población manejada individuos silvestres con diferentes alelos y niveles de heterocigosidad (Hahn y Culver, 2021). En el caso del berrendo peninsular, no quedan individuos silvestres. Sin embargo, existen otras subespecies, y hasta hace poco, no estaba claro si el berrendo peninsular es genéticamente diferente de sus conespecíficos.

En la conservación, los niveles de diferenciación entre poblaciones, subespecies o variedades son de gran importancia. Por ejemplo, las cruas entre poblaciones genéticamente divergentes dentro de una especie pueden resultar en una reducción de la aptitud, conocida como depresión exogámica (Whitlock *et al.*, 2013). Los principales mecanismos que causan la depresión exogámica son las diferencias cromosómicas fijas y las diferencias genéticas adaptativas. Si se cruzan dos individuos adaptados a su entorno, el híbrido puede no ser adecuado para el entorno de ninguno de los progenitores (Frankham *et al.*, 2010; 2011). Por lo tanto, era importante determinar si existía una diferencia genética entre las subespecies de berrendos.

Los niveles de diferenciación genética se estiman habitualmente con el índice F_{ST} (o sus variaciones según los tipos de marcadores genéticos). Este índice varía de 0, en el que las poblaciones analizadas son idénticas, a 1, en el que no se comparten alelos y las poblaciones están fijas para diferentes alelos. La diferenciación genética puede reducirse si hay flujo genético entre poblaciones; de lo contrario, aumentará a lo largo de las generaciones. Normalmente, un F_{ST} superior a ~0.15 se considera una indicación de diferenciación considerable entre poblaciones (Frankham *et al.*, 2010).

Por primera vez, la diferenciación genética entre el berrendo sonoreNSE y el peninsular se estimó utilizando dos tipos de marcadores genéticos: microsatélites y ADN mitocondrial. Se encontró una fuerte diferenciación genética y un bajo número de alelos compartidos (Klimova *et al.*, 2014). La

diferenciación genética encontrada fue alta, F_{ST} de 0.56 para el ADN mitocondrial y de 0.35 para los microsatélites (Klimova *et al.*, 2014). La diferenciación genética entre las subespecies peninsular y americana varió de 0.24 a 0.30, lo que indica una diferenciación considerable entre dichas subespecies (Hahn *et al.*, 2020). Estos hallazgos sugieren que el berrendo de la península es genéticamente único y debe ser tratado y conservado en consecuencia. Además, esta información fue crucial para que la Lista Roja de la UICN reconociera al berrendo de la península como una subespecie distinta y lo clasificara como subespecie en peligro de extinción (Sánchez *et al.*, 2020). Antes de estos datos, la UICN no reconocía ninguna subespecie, y el berrendo (incluyendo todas las subespecies) estaba catalogado bajo el estatus de Preocupación Menor (<https://www.iucnredlist.org/es/species/1679/200726719>). La alta diferenciación genética entre las subespecies de berrendo indica que la introducción de individuos de otra subespecie en la manada cautiva de berrendo peninsular no sería adecuada.

En la actualidad, el berrendo peninsular se encuentra únicamente en el desierto de Vizcaíno, en el Área de Protección de Flora y Fauna Valle de los Cirios, cerca de la ciudad de Guerrero Negro, México. Sin embargo, se ha sugerido que su área de distribución solía ser mayor, cubriendo gran parte de la península de Baja California, desde las bahías de San Felipe y San Quintín hacia el sur hasta la bahía de Magdalena (Nelson, 1925). Determinar el área de distribución histórica de una especie en peligro de extinción es una tarea importante, pero complicada; se puede lograr utilizando muestras históricas de museos (Nakahama, 2020). En el caso del berrendo, se recolectaron pieles y cuernos de los individuos muertos de varias áreas donde la especie fue exterminada (sur de California y norte de Baja California) (Hahn *et al.*, 2020). Una vez extraído el ADN de las muestras históricas, éste se comparó con el de las subespecies peninsular, sonorense y americana. Sorprendentemente, se encontró que el área de distribución del berrendo peninsular se extendía mucho más al norte de lo que se pensaba, llegando casi a la frontera entre Estados Unidos y México (Figura 2). Sin embargo, las muestras históricas del sur de California y Arizona pertenecían a la subespecie americana. También se encontró que el berrendo peninsular tenía una afinidad genética más cercana a la subespecie americana que a la subespecie de Sonora (Hahn *et al.*, 2020). Esta información es de gran importancia para los programas de reintroducción, ya que permite determinar qué subespecies se adaptarán mejor al área geográfica específica y garantizar una reintroducción exitosa.

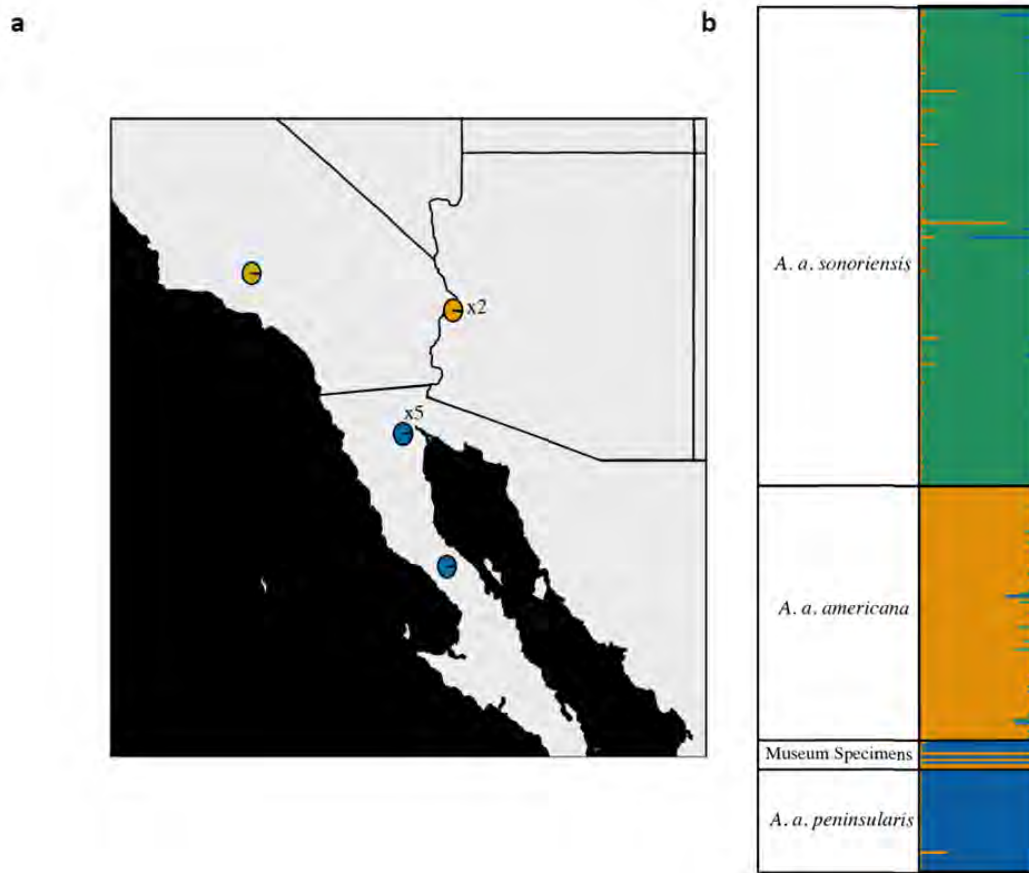


Figura 2. Estructura genética poblacional y reconstrucción del área de distribución histórica del berrendo. (a) Un mapa del área de estudio que muestra la pertenencia a la población (representada por gráficos circulares) para muestras de museos. (b) Resultados de la evaluación de la pertenencia poblacional de muestras de museo de berrendos en relación con muestras contemporáneas de tres subespecies recolectadas en Estados Unidos y México. Los colores utilizados corresponden a: azul – berrendo peninsular, naranja – berrendo americano y verde -berrendo sonorenses. Modificado de Hahn et al. 2020.

Perspectivas y consideraciones

Las actividades humanas han llevado al berrendo peninsular al borde de la extinción. Sin embargo, gracias al exitoso manejo en cautiverio del Programa de Recuperación del Berrendo Peninsular, la especie ha persistido y actualmente cuenta con una población de aproximadamente 600 individuos. Todos estos animales se manejan in situ en el área de distribución histórica del berrendo, en la Reserva de la Biosfera El Vizcaíno y el Área de Protección de Flora y Fauna Valle de Los Cirios. Además, más de 40 especímenes se encuentran bajo cuidado humano en los EE. UU., en un consorcio de zoológicos en el suroeste del país. El objetivo principal del programa de recuperación es restablecer las poblaciones silvestres en su hábitat histórico, cubriendo toda la península de Baja

California. Aunque existe una clara tendencia positiva en la recuperación del berrendo peninsular, aún persisten muchos desafíos y preguntas por responder. Entre las principales incógnitas se encuentran: ¿Existe depresión endogámica en la población de berrendo peninsular? ¿Se han acumulado mutaciones deletéreas en su genoma, o han sido eliminadas durante el cuello de botella poblacional? ¿La diferenciación genética entre las subespecies de berrendos se deben a un proceso neutral o adaptativo, y qué regiones genómicas han sido afectadas por la selección? ¿Han cambiado genéticamente los berrendos y se han adaptado al cautiverio? Estas son sólo algunas de las preguntas que esperan respuestas y que, sin duda, contribuirán a un manejo más efectivo de esta especie única.

Referencias

- Allendorf, F.W., y G. Luikart. 2013. Conservation and the genetics of populations. Hoboken: John Wiley & Sons. 602 pp.
- Bean, W.T., H.S. Butterfield, C. Fiehler, D. Hacker, J.K. Howard, R. Namitz, B. Swanson, y T.J. Batter. 2023. Contrasting management paradigms for pronghorn in the arid Southwest and their northern range: a review. *Journal of Wildlife Management* 88(2).
- Cancino, J., A. Ortega-Rubio y R. Rodríguez-Estrella. 1998. Population size of the Peninsular pronghorn in Baja California Sur, Mexico. *California Fish and Game* 84:25–30.
- Cancino, J., V. Sanchez-Sotomayor y R. Castellanos. 2005. From the Field: Capture, hand-raising, and captive management of peninsular pronghorn. *Wildlife Society Bulletin* 33(1): 61–65.
- Chen, L., Q. Qiu, Y. Jiang, K. Wang, Z. Lin, Z. Li, F. Bibi, Y. Yang, J. Wang, W. Nie, W. Su, G. Liu, Q. Li, W. Fu, X. Pan, C. Liu, J. Yang, C. Zhang, Y. Yin y W. Wang. 2019. Large-scale ruminant genome sequencing provides insights into their evolution and distinct traits. *Science* 364(6446).
- Cloudsley-Thompson, J. L., M.E. Soule y B.A. Wilcox. 1981. Conservation biology. An evolutionary-ecological perspective. *Journal of Applied Ecology* 18(3): 980.
- Cornuet, J., F. Santos, M.A. Beaumont, C.P. Robert, J. Marin, D.J. Balding, T. Guillemaud y A. Estoup. 2008. Inferring population history with DIY ABC: a user-friendly approach to approximate Bayesian computation. *Bioinformatics* 24(23): 2713–2719.
- Dirzo, R., H.S. Young, M. Galetti, G. Ceballos, N.J.B. Isaac y B. Collen. 2014. Defaunation in the

- Anthropocene. *Science* 345(6195): 401–406.
- Frankham, R., J.D. Ballou y D.A. Briscoe. 2010. *Introduction to Conservation Genetics*. Cambridge: Cambridge University Press. 644 pp.
- Frankham, R., J.D. Ballou, M. D. Eldridge, R.C. Lacy, K. Ralls, M.R. Dudash y C. Fenster. 2011. Predicting the probability of outbreeding depression. *Conservation Biology* 25(3): 465–475.
- Frankham, R., C.J. Bradshaw y B.W. Brook. 2014. Genetics in conservation management: Revised recommendations for the 50/500 rules, Red List criteria and population viability analyses. *Biological Conservation* 170: 56–63.
- Hahn, E. E., y M. Culver. 2021. Genetic diversity and structure in Arizona pronghorn following conservation efforts. *Conservation Science and Practice* 3(10).
- Hahn, E. E., A. Klimova, A. Munguía-Vega, K.B. Clark y M. Culver. 2020. Use of museum specimens to refine historical Pronghorn subspecies boundaries. *Journal of Wildlife Management* 84(3): 524–533.
- Heffelfinger, J. R., B.W. O’Gara, C. Janis y R. Babb. 2004. A bestiary of ancestral antilocaprids. *Proceedings of the 20th Biennial Pronghorn Workshop* 20:87-111.
- Humble, E., M.A. Stoffel, K. Dicks, A.D. Ball, R.M. Gooley, J. Chuven, R. Pusey, M.A. Remeithi, K. Koepfli, B. Pukazhenth, H. Senn y R. Ogden. 2023. Conservation management strategy impacts inbreeding and mutation load in scimitar-horned oryx. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 120(18).
- Jamieson, I. G., y F.W. Allendorf. 2012. How does the 50/500 rule apply to MVPs? *Trends in Ecology and Evolution* 27(10): 578–584.
- Klimova, A., J.N. Gutiérrez-Rivera, V. Sánchez-Sotomayor y J.I. Hoffman. 2022. The genetic consequences of captive breeding, environmental change and human exploitation in the endangered peninsular pronghorn. *Scientific Reports* 12(1).
- Klimova, A., A. Munguía-Vega, J.I. Hoffman y M. Culver. 2014. Genetic diversity and demography of two endangered captive pronghorn subspecies from the Sonoran Desert. *Journal of Mammalogy* 95(6): 1263–1277.
- Krausman, P. R., y J.A. Byers. 1998. American Pronghorn: Social adaptations and the Ghosts of Predators Past. *Journal of Wildlife Management* 62(4): 1580.

- Laliberte, A. S., y W. J. Ripple. 2004. Range contractions of North American carnivores and ungulates. *BioScience* 54(2): 123.
- Lee, T. E., J.W. Bickham y M.D. Scott. 1994. Mitochondrial DNA and allozyme analysis of North American pronghorn populations. *Journal of Wildlife Management* 58(2): 307.
- Nakahama, N. (2020). Museum specimens: An overlooked and valuable material for conservation genetics. *Ecological Research* 36(1): 13–23.
- Nelson, E.W. 1925. Status of the pronghorn antelope 1922-1924. U.S. Department Agriculture Bulletin 1346: 1-66.
- O’Gara, B. W., J.D. Yoakum, R.A. McCabe, E. Fichter y D.P. Metz. 2004. Pronghorn : ecology and management. University Press of Colorado. 948 pp.
- Sánchez, V., J. Warman, F. Ramírez, J. Holland, K. Clark, A. Sánchez y M. Gutierrez. 2020. Peninsular Pronghorn Recovery Program. *Gnusletter* 37(2): 15-23.
- SEMARNAT [SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES]. 2009. Programa de acción para la conservación de la especie: berrendo (*Antilocapra americana*). Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, México D.F., México.
- Stephen, C. L., J.C. Devos, T.E. Lee, J.W. Bickham, J.R. Heffelfinger y O.E. Rhodes. 2005. Population genetic analysis of sonoran pronghorn (*Antilocapra americana sonoriensis*). *Journal of Mammalogy* 86(4): 782–792.
- Vellend, M., y M.A. Geber. 2005. Connections between species diversity and genetic diversity. *Ecology Letters* 8(7): 767–781.
- Whitlock, R., G.B. Stewart, S.J. Goodman, S.B. Piertney, R.K. Butlin, A.S. Pullin y T. Burke. 2013. A systematic review of phenotypic responses to between-population outbreeding. *Environmental Evidence* 2(1): 13.
- Willi, Y., T.N. Kristensen, C.M. Sgrò, A.R. Weeks, M. Ørsted y A. A. Hoffmann. A. 2021. Conservation genetics as a management tool: The five best-supported paradigms to assist the management of threatened species. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119(1).
- Zurano, J. P., F. M. Magalhães, A.E. Asato, G. Silva, C. J. Bidau, D.O. Mesquita y G.C. Costa. 2018. Cetartiodactyla: Updating a time-calibrated molecular phylogeny. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 133: 256-262..

Ficha curricular:

Dra. Klimova Anastasia, postdoctorante en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SNII nivel 1. Línea de investigación incluye genética y genómica de la conservación de las poblaciones de especies de plantas y animales endémicos y en peligro de extinción. anastasia_aleksandrovna@hotmail.com

Dr. Jesús Neftalí Gutiérrez Rivera, Técnico Responsable del Laboratorio de Biología Molecular del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SNII nivel 1. Interesado en la aplicación de las herramientas de Biología molecular para resolver problemáticas en áreas como patología, genética, genómica entre otras. jtali04@cibnor.mx

Cita

Klimova A. y J.N. Gutiérrez Rivera. La genética de la conservación aplicada: el caso de berrendo peninsular. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (1): 73-88. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0005>

Sometido: 18 de octubre de 2024

Aceptado: 17 de enero de 2025

Editores ejecutivos: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editores asociados: Dra. Paulina Mejía Ruíz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrasco

Functional implications of the use of the upper jaw (Bill)
of the striped marlin in its feeding strategy

Implicaciones funcionales del uso del maxilar superior (pico) del marlín rayado en su estrategia alimentaria

Leonardo Andrés Abitia-Cárdenas¹, Marcial Trinidad Villalejo-Fuerte¹,
Víctor Hugo Cruz-Escalona^{1*} y Jesús Rodríguez-Romero²

Resumen

Sin lugar a duda una de las principales características de los peces de pico (familia Istiophoridae y Xiphiidae) es la elongación de los huesos premaxilares que forman su rostrum en forma de pico. A lo largo del tiempo dicha estructura mandibular ha causado controversia con respecto a su uso, por lo que, en este contexto, en el presente trabajo se realizó un análisis de las evidencias documentadas de las posibles implicaciones del uso del pico del marlín rayado (*Kajikia audax*) en sus hábitos alimentarios. Así, la modificación y crecimiento de los huesos premaxilar y prenasal forman un rostrum redondeado, adquiriendo una forma corporal hidrodinámica, que los faculta a tener un desplazamiento de mayor dinamismo y por ende una alta eficiencia en su conducta trófica.

Palabras clave

Picudos, morfología funcional, depredadores tope.

¹Instituto Politécnico Nacional - Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR-IPN), Departamento de Pesquerías y Biología Marina. Av. Instituto Politécnico Nacional s/n Col. Playa Palo de Santa Rita Apdo. Postal 592. La Paz, B. C. S., México. C.P. 23096.

²Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Km. 1 Carretera a San Juan de La Costa "El Comitán" La Paz, Baja California Sur. C.P. 23205.

*Autor para la correspondencia: vescalon@ipn.mx



Abstract

Undoubtedly, one of the main characteristics of billfish (family Istiophoridae and Xiphiidae) is the elongation of the premaxillary bones that form their beak-shaped rostrum. This mandibular structure has caused controversy over time regarding its use, so in this context, in the present study an analysis of the documented evidence of the possible implications of the use of the beak was carried out of the striped marlin (*Kajikia audax*) in their feeding habits. Thus, the modification and growth of the premaxillary and prenasal bones form a rounded rostrum, acquiring a hydrodynamic body shape, which helps them to have a more dynamic movement and therefore a high efficiency in their trophic behavior.

Keywords

Billfish, functional morphology, top predator.

Introducción

Los picudos o peces de pico (marlines, pez vela y pez espada; Fig. 1) son especies marinas carismáticas que tienen una distribución global y se encuentran entre los nadadores más rápidos de los océanos. Estas especies están altamente especializadas para la vida en el entorno pelágico y tienen adaptaciones corporales únicas, por ejemplo, un alargamiento extremo de los huesos de la mandíbula superior que forman el rostro (Fig. 2), cuyas funciones principales han sido objeto de muchas hipótesis sobre su uso en la alimentación (Domenici *et al.*, 2014). Un análisis reciente de datos de tensión ósea apoya la idea de que el pico de los marlines y los peces vela se utiliza de manera diferente al atacar a sus presas (Habegger *et al.*, 2015).



Figura 1. Especies más carismáticas de picudos que se distribuyen en el Pacífico mexicano.

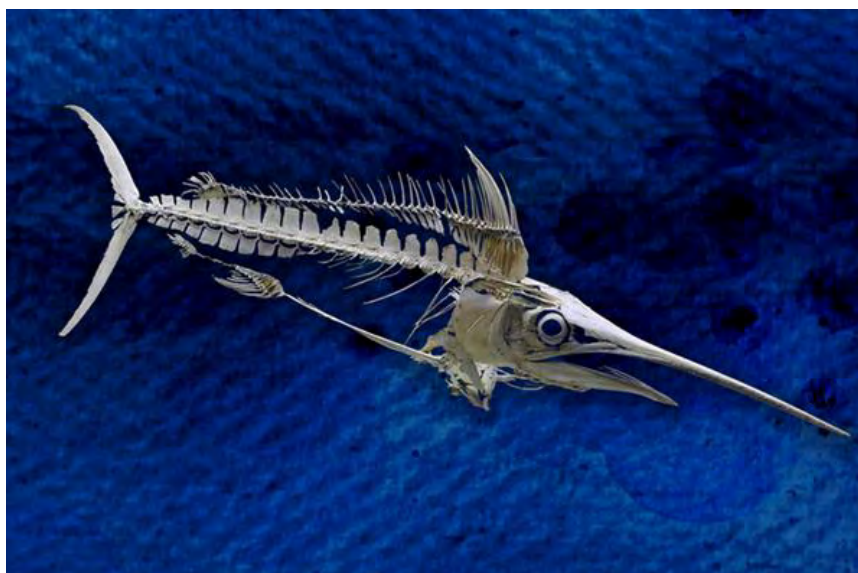


Figura 2. . El alargamiento extremo de los huesos de la mandíbula superior que forman el rostro es la característica morfológica que caracterizan a los picudos.



En el Pacífico mexicano una de las especies de pico más importantes es el marlín rayado (*Kajikia audax*; Fig. 3), el cual, de acuerdo con la literatura especializada se alimenta preferentemente de organismos epipelágicos de la zona nerítica y en menor grado de organismos provenientes de aguas oceánicas. Las presas más comunes son los peces pelágicos formadores de cardúmenes (Fig. 4), destacan la macarela *Scomber japonicus*, las sardinas *Sardinops caeruleus* y *Etrumeus teres*, y los carangidos *Decapterus muroadsi* y *Selar crumenophthalmus*. Otras de las presas registradas forman parte del neuston demersal, el cual involucra a organismos que pasan la mayor parte de su ciclo de vida cerca del fondo, como son: la merluza *Merluccius productus*, el pez soldadito *Prionotus spp.*, el cabaicucho *Diplectrum spp.* y el pez sapo *Kathetostoma avaruncus* (Abitia et al., 2011; Fig. 5).



Figura 3. El marlín rayado *Kajikia audax* se constituye como una de las especies de picudos más importantes para la pesca deportiva en México.



Figura 4. Las especies presa de mayor relevancia para los picudos, son los peces pelágicos formadores de cardúmenes.

También consume moluscos cefalópodos tales como el calamar gigante *Dosidicus gigas* y el nautilo *Argonauta spp.*, crustáceos como la langostilla *Pleuroncodes planiceps* y el estomatópodo *Squilla spp* (Fig. 5) Esta alta variedad de presas (amplitud de nicho trófico) en los estómagos del marlín rayado, son evidencias contundentes de migraciones verticales y horizontales en busca de las presas que conforman su dieta (Abitia *et al.*, 2012).



Figura 5. El espectro trófico del marlín rayado registra una alta diversidad de presas, evidencia de las migraciones verticales y horizontales que realiza para alimentarse.



Algunos estudios telemétricos en peces de las familias Istiophoridae y Xiphiidae han revelado que las migraciones verticales en el marlín rayado, marlín azul (*Makaira nigricans*) y pez vela (*Istiophorus platypterus*) son de duración corta y a profundidades moderadas, mientras en el caso del pez espada (*Xiphias gladius*), los desplazamientos son a mayor profundidad y por períodos prolongados. Específicamente en el marlín rayado, investigaciones de marcado y telemetría (Holts y Bedford, 1990; Brill et al., 1993) han evidenciado que esta especie pasa la mayor parte del tiempo en la superficie (10 m) del agua, sin embargo, también han podido documentar que el marlín rayado es capaz de realizar inmersiones hasta una profundidad de 170 m, especialistas sobre el tema mencionan que dichos movimientos verticales están influenciados por la temperatura del agua. Aunque el marlín rayado parece ocupar preferentemente el hábitat cercano a la superficie. Block et al. (1992a) señalan que en las aguas frías de California esta especie se puede mover a través de la termoclina y en algunas ocasiones se alimenta en profundidades similares a las del marlín azul.

Por otro lado, los movimientos horizontales del marlín rayado han sido relacionados con la búsqueda de masas de agua más adecuadas para el crecimiento y sobrevivencia de las larvas. Los juveniles y adultos inmaduros se ubican en aguas con alta disponibilidad de presas. Estos peces migran regularmente a lugares donde las condiciones son más adecuadas en una fase particular de su vida, por lo que se considera que las migraciones son de importancia adaptativa, ya que los organismos aseguran condiciones favorables para su existencia y reproducción (Radakov, 1973).

El marlín rayado y otras especies de peces de pico presentan migraciones activas desplazándose en la dirección que su curso de orientación le indique. Este tipo de migraciones son energéticamente costosas e implican movimientos de una región geográfica a otra, distantes en términos de la velocidad de crucero óptimo de la especie. Estos movimientos son regularmente de ciclos estacionales relacionados con conductas de alimentación (Sharp y Dotson, 1977; Weihs, 1984). En muchos casos la supervivencia de la especie depende en gran medida de que tan efectivas son sus estrategias para almacenar energía durante periodos donde el alimento es escaso.

Entre las primeras etapas de gasto energético asociado al proceso alimentación en peces pelágicos están la búsqueda, persecución, captura (manipulación) y digestión, por lo tanto, la estrategia de una alimentación óptima será el balance de estos factores (Moyle y Ceach, 1988). De manera general se reconoce que la selección natural ha favorecido a los depredadores para que a partir del uso de diferentes estrategias puedan maximizar la eficiencia de la captura de presas, para incrementar la ganancia de energía neta (con el menor gasto energético), con el propósito de eficientizar su funcionamiento metabólico. En ese sentido, los peces de pico y en especial el marlín

rayado presentan estrategias para una óptima alimentación que pueden estar asociadas con su patrón de movimiento y detección del alimento. Este tipo de depredadores presentan dos tipos de velocidades de nado: 1) la velocidad óptima de alimentación, en donde se maximiza la tasa de energía consumida y, 2) la velocidad de crucero óptimo, con la cual se maximiza la distancia recorrida por unidad de energía consumida (Ware, 1978).

El concepto de velocidad óptima de alimentación implica que este tipo de depredadores pelágicos responden a las variaciones en la disponibilidad y abundancia del alimento, con cambios en su velocidad para maximizar su tasa de producción. De acuerdo con Block *et al.* (1992b), los marlines tienen la capacidad de que logran desarrollar altas velocidades en períodos cortos, lo cual les facilita la captura de presas disponibles. En cuanto al concepto de velocidad de crucero óptimo este se puede definir como la velocidad a la cual el gasto de energía (costo) por unidad de distancia recorrida es mínima. La mayor cantidad de información que se ha generado sobre las velocidades de crucero en los peces pelágicos se debe a la subsecuente recaptura de organismos marcados en diferentes épocas y lugares de aquel en donde fueron capturados, marcados y liberados. Una de las más notables distancias recorridas registradas para los peces de pico es la de un marlín negro (*Istiompax indica*), un organismo de 58 kg que fue marcado y liberado en Baja California y posteriormente recapturado a 10,000 km del punto de liberación en Nueva Zelanda por un barco de pesca comercial japonés (Block *et al.*, 1992b; Fig. 6).

En la literatura especializada sobre peces de pico, existen frecuentes referencias de que la mayoría de ellos son nadadores muy veloces (p. ej. Davie, 1990; Domenici *et al.* 2014), pero a la luz de estudios sobre marcado y seguimiento telemétrico, en donde se registran los movimientos verticales y horizontales de especies como el marlín rayado y marlín azul (Block *et al.*, 1992 a y b; Brill *et al.*, 1993), se ha logrado establecer que la velocidad de crucero de estas especies es relativamente lenta, lo cual sugiere que las bajas velocidades de nado son una adaptación para minimizar el alto costo energético de la locomoción a grandes distancias.

Asimismo, si se considera que en los mares cálidos en donde se distribuyen estos organismos, los recursos alimenticios con frecuencia están distribuidos heterogéneamente, el minimizar el gasto de energía para cubrir grandes distancias entre los parches alimenticios, puede sin duda ser altamente ventajoso ya que de acuerdo con Weihs (1984), la mayor eficiencia de la energía de nado (energía mínima gastada por distancia recorrida) se logra con la menor velocidad.



Figura 6. Los picudos, especies altamente migratorias por lo cual son denominados peces sin patria.

Los marlines al estar altamente adaptados al tipo de vida pelágico poseen numerosas estructuras morfológicas y fisiológicas que optimizan su desempeño locomotor. Así en el caso particular del marlín rayado su cuerpo es extremadamente hidrodinámico, presentando aletas pectorales recorridas hacia el dorso con grandes superficies de área. Una de las principales características morfológicas es el alargamiento de sus huesos premaxilar y prenasal para formar un pico redondeado, lo cual muy probablemente le ayude a reducir la resistencia frontal del agua (Nakamura, 1985).

La información sobre los hábitos alimentarios de los peces de pico proviene principalmente del análisis del contenido estomacal, lo cual ha brindado evidencias de cortes en los cuerpos de las especies presa encontrados en sus estómagos y de cuyas lesiones, se ha inferido que el pico podría usarse como una estructura para golpearlas y capturarlas (Scott y Tibbo, 1968; Shimose *et al.*, 2007). Sin embargo, existen trabajos en donde se ha demostrado que los cuerpos de las presas pueden estar libres de lesiones (Vaske Jr. *et al.*, 2011), lo cual es muy consistente con las observaciones de peces picudos que se encuentran en condiciones corporales óptimas pero cuyos picos se han roto o están muy dañados y/o doblados, lo cual ha llamado a cuestionar si los picos son realmente necesarios para la captura de presas (Wisner, 1958, Domenici *et al.*, 2014).

Como es evidente existen opiniones encontradas sobre el posible uso del pico para la obtención del alimento, así Evans y Wares (1972) señalaron la presencia de presas con lesiones ocasionadas por el pico del marlín rayado, lo cual probablemente las realiza para debilitar a la presa y hacer más fácil su ingestión. Sin embargo, Hubbs y Wisner (1953), documentaron que en ninguna de las presas consumidas por el marlín rayado en California se presentan lesiones que pudieran ser ocasionadas por el pico de este organismo.

De igual forma Strasburg (1969) al registrar el testimonio de un investigador de la Universidad de Hawaii, el cual observó a un marlín atravesar con su pico a un pez dorado *Coryphaena spp.* (Fig. 7), concluye que este comportamiento del marlín es poco usual ya que la mayoría de las presas encontradas en los contenidos estomacales no presentan lesiones ocasionadas por el pico. En contra parte existen antecedentes de reportes de ataques de peces de pico al tiburón *Isurus oxyrinchus*, por ejemplo, Cliff *et al.* (1990) documentaron que el pico de un pez vela fue encontrado embebido en la órbita ocular izquierda de un tiburón capturado en África del Sur, mientras que Fierstine *et al.* (1997), reportaron que el pico de un marlín azul también estaba embebido en el lado izquierdo del cuerpo (a nivel de la segunda aleta dorsal) de otro tiburón capturado en Ensenada Baja California, México. Asimismo, Domenici *et al.* (2014), registraron la primera evidencia directa de cómo el pez vela del Atlántico (*Istiophorus albidus*) utiliza el pico para capturar presas que se agrupan en cardúmenes a través de una combinación de sigilo y movimiento extremadamente rápido, en donde emplean su pico para aislar y capturar presas a través de dos estrategias de ataque principales, la de golpear y cortar.



Figura 7. Marlín rayado, atraviesa con su pico a un pez dorado *Coryphaena spp.*

En varios estudios realizados sobre los hábitos alimentarios de tres especies de pico en aguas del Pacífico mexicano, marlín rayado (Abitia-Cárdenas et al., 1997, 1998, 2002, 2011, 2012), marlín azul (Abitia et al., 1999, 2010) y pez vela (Rosas-Alayola et al., 2002; Arizmendi-Rodríguez et al., 2006; Hernández-Aguilar et al., 2013) no han sido reportados vestigios de un comportamiento alimentario en donde las presas registren algún tipo de daño físico como evidencia del uso del maxilar superior. Sin embargo, resulta claro que, en los peces de pico, la modificación y crecimiento de los huesos premaxilar y prenasal en un rostrum redondeado en el caso de la familia Istiophoridae y aplanado en la familia Xiphiidae (Fierstine, 1990; Domenici et al., 2014), les permite adquirir una forma más hidrodinámica, que les ayuda a tener un desplazamiento de mayor dinamismo y por ende de una mayor eficiencia en su conducta alimentaria, debido a lo cual la estructura mandibular pudiera estar cumpliendo también funciones diferentes a la alimentación, por lo que claramente, los estudios comparativos sobre la morfología y el comportamiento de las especies de peces de pico son necesarios para aportar mayores evidencias sobre la evolución de estos destacables rasgos morfológicos y su uso para la captura y consumo de presas (Fig. 8).



Figura 8. La modificación y crecimiento de los huesos premaxilar y prenasal en un rostrum, les permite a los picudos tener un desplazamiento de mayor dinamismo y por ende de una mayor eficiencia en su conducta alimentaria.

Conclusiones

En el marlín rayado la modificación y crecimiento de los huesos premaxilar y prenasal en un rostrum redondeado, le permiten poseer una forma corporal más hidrodinámica, que les ayuda a tener un desplazamiento de mayor dinamismo y por ende una mayor eficiencia en su conducta trófica, por lo tanto, la estructura mandibular además de cumplir funciones importantes en su velocidad de desplazamiento desempeña un papel determinante en su estrategia alimentaria.

Agradecimientos

Todos los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) y a la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), por el financiamiento a través de proyectos de investigación sobre Peces de Pico. LAAC, MTVF y VHCE agradecen el apoyo recibido del IPN a través de la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas y Estímulos al Desempeño de los Investigadores. Asimismo, JRR da las gracias al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR).



Referencias

- Abitia, C.L.A., F.M. Galvan y R.J. Rodriguez. 1997. Food habits and energy values of prey of striped marlin *Tetrapturus audax* (Philippi, 1887) off the coast of Mexico. *Fishery Bulletin* 95: 360-368.
- Abitia, C.L.A., Galvan, M.F. y Muhlia, M.A. 1998. Espectro trófico del marlín rayado *Tetrapturus audax* (Philippi, 1887), en el área de Cabo San Lucas, Baja California Sur, México. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 33:277-290.
- Abitia-Cárdenas, L.A., F. Galván-Magaña, F.J. Gutiérrez-Sánchez, J. Rodríguez-Romero, B. Aguilar-Palomino y A. Moehl-Hitz. 1999. Diet of blue marlin *Makaira mazara* off the coast of Cabo San Lucas, Baja California Sur, Mexico. *Fisheries Research* 44: 95-100. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(99\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(99)00053-3)
- Abitia-Cárdenas, L.A., A. Muhlia-Melo, V.H. Cruz-Escalona y F. Galván-Magaña. 2002. Trophic dynamics and seasonal energetics of striped marlin *Tetrapturus audax* in the southern gulf of California, Mexico. *Fisheries Research* 57: 287-295. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(01\)00350-2](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(01)00350-2)
- Abitia-Cárdenas, L.A., D.I. Arizmendi-Rodríguez, N. Gudiño-González y F. Galván-Magaña. 2010. Feeding of blue marlin *Makaira nigricans* off Mazatlan, Sinaloa, Mexico. *Latin American Journal of Aquatic Research* 38(2): 281-285. <https://doi.org/10.3856/vol38-issue2-fulltext-14>
- Abitia-Cárdenas, L.A., F. Galván-Magaña, V.H. Cruz-Escalona, M.S. Peterson y J. Rodríguez-Romero. 2011. Daily food intake of *Kajikia audax* (Philippi, 1887) off Cabo San Lucas, Gulf of California, Mexico. *Latin American Journal of Aquatic Research* 39(3): 449-460. <https://doi.org/10.3856/vol39-issue3-fulltext-6>
- Abitia-Cárdenas, L.A., D.I. Arizmendi-Rodríguez, V.H. Cruz-Escalona y C. Manjarrez-Acosta. 2012. Feeding of striped marlin, *Kajikia audax* (Philippi 1987), from the area off the coast of Mazatlan, Sinaloa, Mexico. *Research Journal Fisheries and Hydrobiology* 7(1): 6-13.
- Arizmendi-Rodríguez, D.I., L.A. Abitia-Cárdenas, F. Galván-Magaña y I. Trejo-Escamilla. 2006. Food habits of sailfish *Istiophorus platypterus* off Mazatlan, Sinaloa, Mexico. *Bulletin of Marine Science* 79(3): 777-791.

- Block, B.A., D. Booth y F.G. Carey. 1992a. Depth and temperature of the blue marlin, *Makaira nigricans*, observed by acoustic telemetry. *Marine Biology* 114: 175-183. <https://doi.org/10.1007/BF00349517>
- Block, B.A., D. Booth y F.G. Carey. 1992b. Direct measurement of swimming speeds and depth of blue marlin. *Journal of Experimental Biology* 166:267-284. <https://doi.org/10.1242/jeb.166.1.267>
- Brill, R.W., D.B. Holts, R.K.C. Chang, S. Sullivan, H. Dewar y F.G. Carey. 1993. Vertical and horizontal movements of striped marlin (*Tetrapturus audax*) near the Hawaiian Islands, determined by ultrasonic telemetry, with simultaneous measurement of oceanic currents. *Marine Biology* 117: 567-574. <https://doi.org/10.1007/BF00349767>
- Cliff, G., S. F. J. Dudley y B. Davis. 1990. Sharks caught in the protective gill nets off Natal, South Africa. 3. The shortfin mako shark *Isurus oxyrinchus* (Rafinesque). *South African Journal of Marine Science* 9(1): 115–126. <https://doi.org/10.2989/025776190784378808>
- Davie, P.S. 1990. Pacific marlins, Anatomy and Physiology. Masey University Printery, Palmerston North, New Zealand. 88 pp.
- Domenici, P., A.D.M. Wilson, R.H.J.M. Kurvers, S. Marras, J.E. Herbert-Read, J.F., Steffensen, S. Krause, P.E. Viblanc, P. Couillaud y J. Krause. 2014. How sailfish use their bills to capture schooling prey. *Proceedings of the Royal Society B* 281: 20140. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0444>
- Evans, D.H. y P.G. Wares. 1972. Food habits of the striped marlin and sailfish off México and southern California. U.S. Department of the Interior. Fish and Wildlife Service. Research Report, 76:1-10.
- Fierstine, H.L. 1990. A paleontological review of three billfish families (Istiophoridae, Xiphiidae and Xiphiorhynchidae). pp. 11-19. En: Stroud, R.H. (Ed.). Planning the future of billfishes: research and management in the 90s and beyond. Proceedings of the Second International Billfish Symposium, Kailua-Kona, Hawaii, August 1-5, 1988. Part 2: Contributed papers. National Coalition for Marine Conservation, Savannah, Georgia. 321 pp.
- Fierstine, H.L., G.M. Cailliet y J.A. Nee. 1997. Shortfin mako, *Isurus oxyrinchus*, impaled by blue marlin, *Makaira nigricans* (Teleostei: Istiophoridae). *Bulletin of the Southern California Academy of Sciences* 96:117-121.



- Habegger, M.L., P.J. Motta, M. Dean, D. Huber, J. Dunlop, G. Mullins, M.J. Stokes, D. Winters. 2015. Feeding biomechanics in billfish: inferring the role of the rostrum during feeding in two billfish species. *Journal of Experimental Biology* 218: 824–836. <https://doi.org/10.1002/ar.24059>
- Hernández-Aguilar, S. B., L. A. Abitia-Cárdenas, X. G. Moreno-Sánchez, M. Arellano-Martínez & E. González-Rodríguez. 2013. Trophic spectrum of the sailfish *Istiophorus platypterus* caught off the Acapulco in the southern Mexican Pacific. *Journal of Marine Biological Association United Kingdom* 93 (4): 1097-1104. <https://doi.org/10.1017/S0025315412001622>
- Holts, D. y D. Bedford. 1990. Activity patterns of striped marlin in the southern California bight. pp. 81-93. En: Stroud, R.H. (Ed.). *Planning the future of billfishes: research and management in the 90s and beyond. Proceedings of the Second International Billfish Symposium, Kailua-Kona, Hawaii, August 1-5, 1988. Part 2: Contributed papers.* National Coalition for Marine Conservation, Savannah, Georgia. 321 pp.
- Hubbs, C.L. y L. Wisner. 1953. Food of marlin in 1951 off San Diego California. *California Fish and Game*, 39:127-131.
- Moyle, P.B. y J.J. Cech Jr. 1988. *Fishes. An Introduction to ichthyology.* 2nd. Ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 559 pp.
- Nakamura, I. 1985. *FAO Species Catalogue, Vol. 5. Billfishes of the world. An annotated and illustrated catalogue of marlins, sailfishes, spearfishes and swordfishes known to date.* Fisheries Synopsis. No. 125. FAO, Rome.
- Radakov, D.V. 1973. *Schooling in the ecology of fish.* John Wiley and Sons, New York. 173 pp.
- Rosas-Alayola, J., A. Hernandez-Herrera, F. Galvan-Magaña. L.A. Abitia-Cardenas y A.F. Muhlia-Melo. 2002. Diet composition of sailfish (*Istiophorus platypterus*) from the southern Gulf of California, Mexico. *Fisheries Research* 57: 185–195. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(01\)00344-7](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(01)00344-7)
- Scott, W.B. y S.N. Tibbo. 1968 Food and feeding habits of swordfish, *Xiphias gladius*, in the Western North Atlantic. *Journal of the Fisheries Board of Canada* 25: 903–919. <https://doi.org/10.1139/f68-084>
- Sharp, G.D. y R.C. Dotson. 1977. Energy for migration in albacore, *Thunnus alalunga*. *Fishery Bulletin* 75: 447-450.

- Shimose, T., K. Yokawa, H. Saito y K. Tachihara. 2007. Evidence for use of the bill by blue marlin, *Makaira nigricans*, during feeding. *Ichthyology Research* 54: 420– 422. <https://doi.org/10.1007/s10228-007-0419-x>
- Strasburg, W.B. 1969. Billfish of the central Pacific Ocean. U.S. Department of the Interior. Fish and Wildlife Service. Bureau of Commercial Fisheries. Circular, 311: 1-20.
- Vaske Jr. T., P.E. Travassos, P.B. Pinheiro, F.H.V. Hazin, M.T. Tolotti, T.M. Barbose. 2011. Diet of the blue marlin (*Makaira nigricans*, Lacepede 1802) (Perciformes: Istiophoridae) of the Southwestern Equatorial Atlantic Ocean. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology* 15: 65–70. <https://doi.org/10.14210/bjast.v15n1.p65-70>
- Ware, D.M. 1978. Bioenergetics of pelagic fish: Theoretical change in swimming speed and ration with body size. *Journal of the Fisheries Board of Canada* 35: 220-228.
- Weihs, D. 1984. Bioenergetic considerations in fish migration. pp. 487-508. En: McCleave, J.D., G.P. Arnold, J.J. Dodson y W.H. Neill (Eds.). *Mechanisms of migration in fishes*. Plenum Press, New York. 574 pp.
- Wisner R.L. 1958. Is the spear of istiophorid fishes used in feeding? *Pacific Science* 12: 60–70.

Fichas curriculares autores

Leonardo Andrés Abitia-Cárdenas es Doctor en Ciencias por la UNAM. Es Profesor-Investigador Titular C, del CICIMAR-IPN. Becario Permanente del Sistema de becas COFAA y EDI (Residente) del IPN. Miembro del Sistema Nacional de investigadores (1992-2025; Investigador Nivel II) y de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC). Evaluador Acreditado del CONAHCyT. Sus líneas de investigación incluyen áreas relacionadas con la evaluación de recursos marinos, taxonomía, biología y ecofisiología de peces marinos y es autor de 102 publicaciones. Correo electrónico: labitia@ipn.mx.

Jesús Romero Rodríguez. Investigador Nacional nivel 1. Profesor-Investigador, cinco años de coordinador en efectos ecológicos de la pesca y un seguimiento actual de 15 años como responsable académico del laboratorio de ecología de peces del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, 93 contribuciones científicas (publicaciones indexadas ISI, capítulos de libros, libros, etc.). Correo electrónico: jrodri04@cibnor.mx

Marcial Trinidad Villalejo Fuerte es Doctor en Ciencias Biológicas por La Universidad de La Habana. Profesor Investigador Titular C de tiempo completo en CICIMAR-IPN. Jefe del Laboratorio de Morfofisiología del CICIMAR desde 1993. Becario permanente del Sistema de Becas COFAA, Becario



EDI del IPN. Investigador Nacional Nivel I. Especialista en biología de la reproducción en organismos marinos. 75 trabajos de investigación publicados, 20 tesis de posgrado dirigidas. Correo electrónico: mvillale@ipn.mx.

Víctor Hugo Cruz Escalona es Doctor en Ciencias Marinas por el IPN-CICIMAR. Profesor titular de tiempo completo adscrito al Departamento de Pesquerías y Biología Marina del IPN-CICIMAR. Investigador nacional nivel 3. Especialista en diversidad funcional de ecosistemas marinos. Correo electrónico: vescalon@ipn.mx

Cita

Abitia-Cárdenas L.A., M.T. Villalejo-Fuerte, V.H. Cruz-Escalona y J. Rodríguez-Romero. Implicaciones funcionales del uso del maxilar superior (pico) del marlín rayado en su estrategia alimentaria. *Recursos Naturales y Sociedad*, 2025. Vol. 11 (1): 90-105. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0006>

Sometido: 29 de octubre de 2024

Aceptado: 12 de febrero de 2025

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editor asociado: Dr. Víctor Manuel Muro Torres

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrasco

Surprising molecular responses in arthropods during hypoxia

Sorprendentes respuestas moleculares en artrópodos durante la hipoxia

Martín Octavio Pérez Aragón¹ y Olivert Martínez Cruz²

Resumen

El oxígeno es uno de los principales elementos vitales para los organismos en el planeta, el cual tiene un rol importante en diversas reacciones del metabolismo, y dependiendo de los niveles que se tenga disponible se presentarán distintas afecciones para el organismo. Cuando el oxígeno disponible no es suficiente para satisfacer las necesidades fisiológicas se denomina hipoxia. Asimismo, se presentarán cambios en el metabolismo con el propósito de adaptarse a estos ambientes hostiles, yendo desde cambios post-traduccionales como una respuesta casi inmediata, a cambios genéticos como una medida de supervivencia a nivel genético. El factor inducido por hipoxia (HIF-1) es una proteína conformada por dos subunidades. Esta proteína incrementa la expresión de genes que permiten la adaptación del organismo frente a la hipoxia. Entre estos genes se encuentran algunos relacionados con la glucólisis, ruta metabólica esencial para obtener energía rápidamente. El oxígeno es de vital importancia para los organismos que habitan el planeta, sin embargo, a menudo no se le da la relevancia que merece al estar tan habituados a él. En este escrito se pretende dar a conocer una de las tantas afectaciones que se presentan en el metabolismo cuando este gas no se encuentra en los niveles adecuados, enfocándonos en los cambios moleculares en los artrópodos.

Palabras clave

Hipoxia, Artrópodos, HIF-1, Glucólisis, Atmósferas modificadas.

¹ Posgrado del Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Col. Centro Hermosillo, Sonora, México.

² Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Col. Centro Hermosillo, Sonora, México

Correspondencia: oliviart.martinez@unison.mx



Abstract

Oxygen is a vital element for organisms on Earth, playing a crucial role in numerous metabolic reactions. The availability of oxygen determines the physiological conditions of the body. When oxygen levels are insufficient to meet physiological needs, it is referred to as hypoxia. Similarly, alterations in metabolism occur to enable adaptation to these challenging environments. These changes range from post-translational modifications, which occur rapidly, to genetic alterations, which are a means of ensuring survival at the genetic level. Hypoxia-induced factor-1 (HIF-1) is a two-subunit protein that directly affects gene expression for adaptation to hypoxia. This is achieved by increasing the expression of genes that respond to these environments, including those related to glycolysis, a metabolic pathway especially important for obtaining rapid energy. Oxygen is of vital importance for the organisms that inhabit the planet. However, it is often not given the relevance it deserves because we are so adapted to it. This paper aims to present one of the many effects of inadequate levels of oxygen on metabolism, with a particular focus on the molecular changes observed in arthropods.

Keywords

Hypoxia, Arthropods, HIF-1, Glycolysis, Modified atmospheres.

Antecedentes

El oxígeno es esencial para el metabolismo de los organismos y para las funciones fisiológicas, debido a que éste es utilizado en una gran variedad de reacciones, cofactores y como sustrato en enzimas para la producción de energía en las células (Choudry y Harris, 2017). Por otro lado, cuando las concentraciones de oxígeno presentes en los tejidos no son suficientes o se encuentran por debajo de los niveles necesarios para llevar a cabo las funciones fisiológicas hablamos de hipoxia (Joiner y Van Der Kogel, 2009).

Así, en la mayoría de los organismos, la hipoxia se puede presentar de dos formas: aguda, dándose en periodos cortos de tiempo, siendo segundos a minutos y afectando la conformación de las proteínas mediante cambios post-traduccionales (cambios sucedidos una vez que la proteína fue sintetizada). La otra forma en que se presenta es en estado crónico y se da en periodos largos de tiempo, siendo respuestas metabólicas más lentas, pudiendo ser horas o días, aquí se involucran

cambios genéticos, como el incremento en la expresión de genes, con el propósito de que los organismos puedan adaptarse a este nuevo ambiente (Lavista, 2004).

Hipoxia en artrópodos

Los artrópodos, pertenecen al filo Arthropoda y es el más extenso en el reino animal y por ende muy susceptible y a la vez adaptados a los cambios en las concentraciones de oxígeno. Los artrópodos son invertebrados que presentan simetría bilateral y están segmentados, con un exoesqueleto de quitina duro y protector. El filo está comprendido por crustáceos (camarones, cangrejos), insectos (escarabajos, hormigas), miriápodos (milpiés y ciempiés) y arácnidos (escorpiones, arañas, ácaros y garrapatas).

Los artrópodos responden a la hipoxia tratando de mantener un equilibrio metabólico, llevando así a diversas respuestas ante este estímulo ambiental. Los artrópodos necesitan equilibrar los riesgos opuestos de toxicidad y privación de oxígeno, es decir, evitan consumir demasiado oxígeno ya que genera estrés oxidativo y evitan ambientes hipóxicos, lo que limita su capacidad para producir energía (Harrison *et al.*, 2018). Por lo general, lo que hacen es regular su capacidad de captación de O₂ (oxígeno) con la demanda de este gas y logran este propósito con distintos mecanismos fisiológicos (Harrison *et al.* 2013). En respuesta a una disminución de la disponibilidad del oxígeno ambiental los artrópodos pueden aumentar rápidamente el suministro de oxígeno a sus tejidos abriendo sus espiráculos, los cuales son una serie de aberturas en el cuerpo, por donde el aire entrará directamente en un sistema de tubos llamada traqueolos, mismos que a su vez se ramifican por todo el cuerpo. La hipoxia se produce cuando estos mecanismos de respuesta rápida para aumentar el suministro de O₂ son insuficientes, arriesgando la producción de energía a manera de ATP (Adenosín trifosfato) (Harrison *et al.* 2018).

Cuando el suministro de O₂ no es el adecuado para la producción de ATP por la vía oxidativa, los artrópodos cambian, al menos de forma parcial, su metabolismo aerobio por uno anaerobio para suplir la deficiencia de ATP. Cuando se da este cambio se acumulan distintos metabolitos producto de estas vías anaerobias, como: lactato, alanina, succinato, malato, fosfato de alfa-glicerol, glicerol, glicerol-3-fosfato, acetato y etanol. Es probable que la producción anaeróbica de ATP sea una estrategia de supervivencia limitada en el tiempo, siendo inclusive de días y en algunos casos semanas (Hoback y Stanley, 2001; Chen *et al.* 2021). Por otro lado, durante la hipoxia la transcripción de algunos genes que participan en rutas glucolíticas puede ser dependiente o independiente del factor inducible por hipoxia (HIF, por sus siglas en inglés) (Li *et al.* 2013)..



Factor inducible por hipoxia (HIF)

Los factores inducibles por hipoxia, HIF-1 y HIF-2, son los principales mediadores en la adaptación celular a hipoxia, se encuentran altamente expresados y cada una ejerce una función diferente. HIF-1 se encuentra presente en algunas las células de los distintos tipos de animales, incluyendo las de artrópodos. Se trata de un complejo proteico formado por dos subunidades diferentes (heterodímero), HIF-1 α y HIF-1 β (Wragner, 2011).

En condiciones normales de oxígeno o normoxia, HIF-1 α interactúa con un grupo de proteínas llamadas Von Hippel-Lindau (VHL), que terminará activando un sistema de degradación llamado sistema ubiquitina ligasa. Para que la subunidad α de HIF-1 sea reconocida es necesario que sea hidroxilada por prolil hidroxilasas. En condiciones de hipoxia, las prolil hidroxilasas se encuentran inactivas y por ende la subunidad HIF-1 α no se hidroxila, se estabiliza, se acumula y une a la subunidad HIF-1 β , para, posteriormente, ser llevada al núcleo de la célula, donde se unirá a elementos de respuesta a la hipoxia (HRE, por sus siglas en inglés) (ver figura 1) (Chao *et al.* 2021). De esta manera, HIF-1 activa diversos genes en los organismos que buscan encontrar un equilibrio metabólico, afectando el metabolismo bioenergético y algunas enzimas de la glucólisis (Yu *et al.* 2001; Mahon *et al.* 2001; Cerychova y Pavlinkova, 2018). Así, todos estos cambios moleculares permiten que las células se adapten a la hipoxia, mediante un cambio hacia una ruta anaerobia, en lugar de una ruta aerobia (Ratcliffe, 2013; Cerychova y Pavlinkova, 2018).

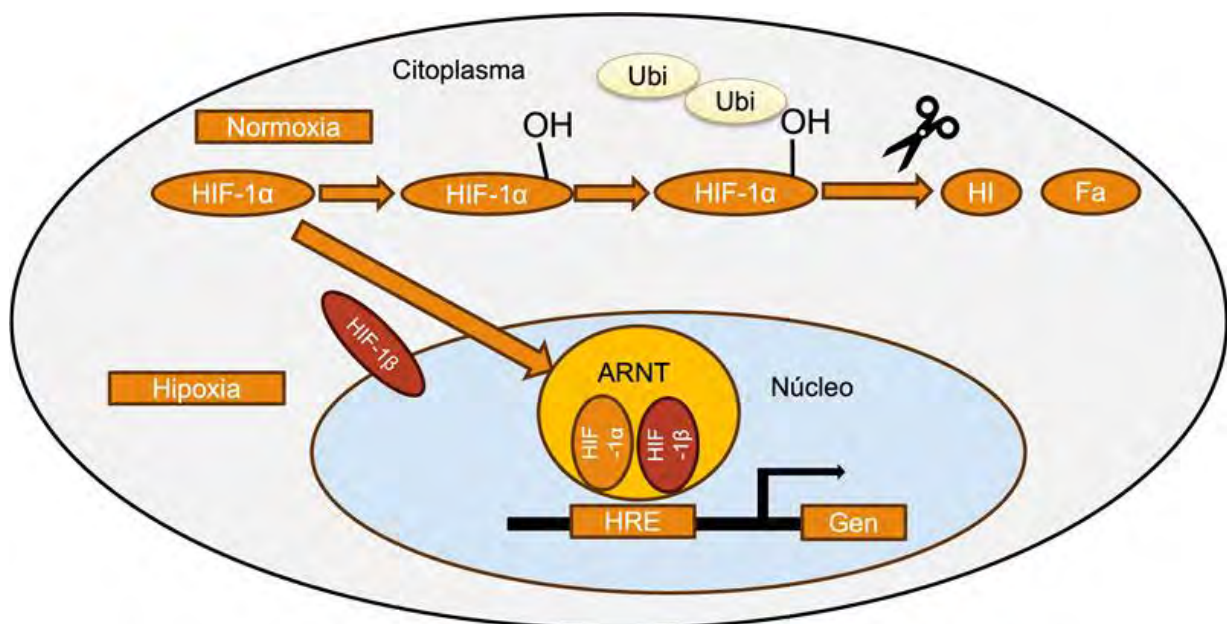


Figura 1. Mecanismo de acción de HIF-1 en condiciones de normoxia e hipoxia. Formación y translocación al núcleo del dímero formado por ambas subunidades de HIF-1. Ubi= Ubiquitina. HRE= Elementos de respuesta a la hipoxia. ARNT=Translocador nuclear del receptor de hidrocarburos de arilo (dímero formado por HIF-1).

Glucólisis en el estado de hipoxia

La glucólisis es una ruta metabólica que ocurre en el citoplasma de la célula y se caracteriza por la conversión de una sola molécula de glucosa en dos moléculas de piruvato (Nelson y Cox, 2009). Esta conversión se da de manera independiente al oxígeno con el trabajo de 10 enzimas metabólicas, con el propósito de proporcionar energía a la célula de manera rápida en forma de ATP. En normoxia, el piruvato generado es metabolizado en las mitocondrias a través del ciclo del ácido tricarboxílico o ciclo de Krebs, a su vez esta ruta proporciona poder reductor, NADH y FADH₂, a la cadena transportadora de electrones (ETC, por sus siglas en inglés), culminando en la generación de aproximadamente 36 moléculas de ATP por cada molécula de glucosa que entra en esta serie de reacciones metabólicas. En estas condiciones las rutas del metabolismo central, siendo glucólisis, ciclo de Krebs y la ETC, generan niveles suficientes de ATP para satisfacer las necesidades bioenergéticas de la célula, los tejidos y el organismo (Chaneton *et al.* 2012).

En condiciones de hipoxia se ve afectada la ETC, la cual es dependiente del oxígeno y por consiguiente el funcionamiento de la fosforilación oxidativa de las mitocondrias, ya que utiliza protones que son bombeados por la ETC, por lo que el organismo opta por el uso de la glucólisis al ser independiente de este sustrato. Este cambio provocará niveles bajos de ATP, trayendo consigo alteraciones en el funcionamiento de las enzimas de la glucólisis, las cuales son inhibidas por las concentraciones altas de ATP debido que se une a regiones específicas alterando el sitio activo de las enzimas (inhibición alostérica). Al contar con concentraciones bajas de ATP se reduce la inhibición de las enzimas que regulan la vía metabólica, como es el caso de la fosfofructoquinasa (PFK), además, la piruvato cinasa no se verá afectada dando una generación de piruvato a partir del fosfoenolpiruvato, metabolito importante para la regeneración de poder reductor en la conversión de piruvato a lactato, este poder reductor será utilizado nuevamente en la glucólisis (Fuhrmann y Brüne, 2017).

Asimismo, la regulación de las enzimas glucolíticas en condiciones de hipoxia va acompañada de una regulación transcripcional. Se ha reportado un incremento en la expresión de estas enzimas, así como en los transportadores de glucosa por HIF, lo que asegura que exista suficiente sustrato para que se lleve a cabo la glucólisis. Estos cambios que ocurrirán en esta vía son ventajosos para mantener la producción de ATP en las células en condiciones de hipoxia (Kierans y Taylor, 2021).



Aplicaciones de los ambientes deficientes de oxígeno

No todo es malo cuando se habla de hipoxia. El ser humano ha desarrollado metodologías para la conservación de alimentos y granos almacenados haciendo uso de estrategias novedosas que tratan de evitar el uso de agentes químicos, que como se sabe, algunos de ellos representan un riesgo a la salud y el medioambiente (Harvey *et al.* 2015).

Así, las atmósferas modificadas surgen como una alternativa y/o solución al uso de los plaguicidas en granos almacenados, con la ventaja que se trata de una tecnología amigable con el medio ambiente e inocua para el humano. Esto radica en el hecho de que en este tipo de ambientes se aprovecha la alteración de la composición de los gases ambientales presentes en un determinado espacio, siendo estos gases: oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono, mismos que repercuten directamente en el metabolismo de los insectos (Cui *et al.* 2017). Se puede hacer uso de las atmósferas deficientes de oxígeno para controlar las plagas que atacan los granos almacenados, existiendo varios estudios como los reportados por Gonçalves *et al.* (2000), Navarro *et al.* (2012), Manojkumar *et al.* (2012) e Iturralde *et al.* (2020) donde los cuatro estudios se enfocaron en evaluar la mortalidad del barrenador menor de los granos, *Rhyzopertha dominica*, en diversas atmósferas modificadas, obteniendo una mortalidad que varía entre el 90-100 %.

Conclusiones

Conocer las repercusiones y los procesos moleculares detrás de los cambios ocurridos a nivel metabólico durante la hipoxia en los artrópodos es sumamente importante, ya que estos animales tienen un rol crucial en la conservación y almacenamiento de granos. Así, entender cómo los artrópodos adaptan su metabolismo en condiciones de hipoxia podría influir en el desarrollo de nuevas tecnologías y estrategias para la conservación de granos y por ende en la generación de alimentos inocuos para el consumo humano

Referencias

- Abass, A.B., G. Ndunguru, P. Mamiro, B. Alenkhe, N. Miliki y M. Bekunda. 2014. Post-harvest food losses in a maize-based farming system of semi-arid savannah area of Tanzania. *Journal of Stored Products Research* 57: 49-57.
- Cerychova, R., y Pavlinkova, G. 2018. HIF-1, metabolism, and diabetes in the embryonic and adult heart. *Frontiers in Endocrinology*, 9, 460.
- Chaneton, B., P. Hillmann, L. Zheng, A.C.L. Martin, O.D.K. Maddocks, A. Chokkathukalam, J.E. Coyle, A. Jankevics, F.P. Holding, K.H. Vousden, C. Frezza, M. O'Reilly y E. Gottlieb. 2012. Serine is a natural ligand and allosteric activator of pyruvatekinase M2. *Nature* 491: 458–462.
- Chao, Y. A. N. G., Zhong, Z. F., Sheng-Peng, W. A. N. G., Chi-Teng, V. O. N. G., Bin, Y. U., y Yi-Tao, W. A. N. G. 2021. HIF-1: structure, biology and natural modulators. *Chinese Journal of Natural Medicines*, 19(7), 521-527.
- Chen, C., Mahar, R., Merritt, M. E., Denlinger, D. L., y Hahn, D. A. 2021. ROS and hypoxia signaling regulate periodic metabolic arousal during insect dormancy to coordinate glucose, amino acid, and lipid metabolism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(1), e2017603118.
- Choudhry, H. y A. L. Harris. 2018. Advances in hypoxia-inducible factor biology. *Cell Metabolism* 27(2): 281-298.
- Cui, S., L. Wang, J. Qiu, Z. Liu y X. Geng. 2017. Comparative metabolomics analysis of *Callosobruchus chinensis* larvae under hypoxia, hypoxia/hypercapnia and normoxia. *Pest Management Science* 73: 1267-1276.
- Fuhrmann, D. C. y B. Brüne. 2017. Mitochondrial composition and function under the control of hypoxia. *Redox Biology* 12: 208-215.
- Goncalves, R.A., J.P. Santos, P.K. Chandra y R. Germani. 2000. Controle de *Rhyzopertha dominica* pela atmosfera controlada com CO₂, em trigo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 35: 01-09.
- Harrison, J. F., K.J. Greenlee y W.C. Verberk. 2018. Functional hypoxia in insects: definition, assessment, and consequences for physiology, ecology, and evolution. *Annual Review of Entomology* 63: 303-325.



- Harrison, J. F., L.T. Wasserthal y R.F. Chapman. 2013. Gaseous exchange. The insects: structure and function: 5th Edition. Cambridge University Press. Nueva York, E.U.A. 501-545 pp.
- Hoback, W. W. y D.W. Stanley. 2001. Insects in hypoxia. *Journal of Insect Physiology* 47(6): 533-542.
- Iturralde-García, R. D., Wong-Corral, F. J., Castañé, C., y Riudavets, J. 2020. Susceptibility of *Rhyzopertha dominica* to high CO₂ modified atmospheres in packaged chickpeas. *Journal of Stored Products Research*, 85, 101537.
- Joiner, M.C. y A. van der Kogel. 2009. Basic Clinical Radiobiology: 4th ed. CRC Press, Hodder Education. Londres, Inglaterra. 224-231 pp.
- Kierans, S. J., y C.T. Taylor. 2021. Regulation of glycolysis by the hypoxia-inducible factor (HIF): implications for cellular physiology. *The Journal of Physiology* 599(1): 23-37.
- Lavista, L. S. 2004. Control de la respuesta transcripcional a hipoxia en *Drosophila melanogaster*, por las proteínas de la familia bHLH-PAS: Similar y Tango, Ph. D tesis, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Argentina. 1-3 pp.
- Li, Y., D. Padmanabha, L.B. Gentile, C.I. Dumur, R.B. Beckstead y K.D. Baker. 2013. HIF-and non-HIF-regulated hypoxic responses require the estrogen-related receptor in *Drosophila melanogaster*. *PLOS Genetics* 9(1): e1003230.
- Mahon, P. C., K. Hirota y G.L. Semenza. 2001. FIH-1: a novel protein that interacts with HIF-1 α and VHL to mediate repression of HIF-1 transcriptional activity. *Genes & Development* 15(20): 2675-2686.
- Manojkumar, T.S., V.V. Sreenarayanan, S. Mohan, y R. Kailappan. 2012. Effect of controlled atmosphere storage on adults and immature stages of *Rhyzopertha dominica* (Fab.). *Journal of Agricultural Engineering* 49(1): 28-35.
- Nelson, D. L. y M.M Cox. 2009. Lehninger principios de bioquímica. Omega. Barcelona, España. 205-230.
- Ratcliffe, P. J. 2013. Oxygen sensing and hypoxia signalling pathways in animals: the implications of physiology for cancer. *The Journal of Physiology* 591(8): 2027-2042.
- Wagner Grau, P. 2011. El factor HIF-1 inducido por la hipoxia y la sensibilidad al oxígeno: Rol del hierro intracelular. *Acta Medica Peruana* 28(3): 163-168.
- Yu, F., S.B White, Q. Zhao y F.S. Lee. 2001. HIF-1 α binding to VHL is regulated by stimulus-sensitive proline hydroxylation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98(17): 9630-9635.

Cita

Pérez Aragón M.O. y Martínez Cruz, O. Sorprendentes respuestas moleculares em artrópodos durante la hipoxia. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (1): 107-115. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0007>

Sometido: 23 de septiembre de 2024

Aceptado: 8 de enero de 2025

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editora asociada: Dra. Marcela Velez Alavez

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

Influence of macronutrients and functional additives on the reproduction of marine fish

Influencia de los macronutrientes y aditivos funcionales en la reproducción de peces marinos

**Marco A. Hernández-de Dios^{1*}, Minerva C. Maldonado-García¹,
Deneb Maldonado-García² y Francisco Encarnación-Ramírez¹**

Resumen

El estudio analiza el conocimiento actual sobre cómo diferentes fuentes de macronutrientes y aditivos funcionales influyen en el rendimiento reproductivo de los peces marinos, especialmente en especies carnívoras. El objetivo fue identificar los macronutrientes y aditivos funcionales más relevantes que tienen el potencial de mejorar el desempeño reproductivo. Se revisaron investigaciones que evaluaron dietas especializadas, con énfasis en las necesidades nutricionales de los peces reproductores, así como el uso de dietas comerciales y experimentales, y su influencia en la viabilidad, eclosión y supervivencia larval tras la suplementación con diferentes compuestos nutricionales. El análisis realizado sugiere que no existe un único macronutriente o aditivo funcional que sea universalmente eficaz para todas las especies. Sin embargo, se destacan los beneficios de las proteínas, aminoácidos, ácidos grasos, vitaminas y carotenos en la nutrición de los reproductores, ya que han demostrado que pueden mejorar la tasa de viabilidad, eclosión y supervivencia en condiciones de cautiverio, destacando la importancia de personalizar las dietas con estos nutrientes según las necesidades específicas de cada especie y las condiciones de cultivo.

Palabras clave

Nutrición; Aditivos funcionales; Macronutrientes; Rendimiento reproductivo.

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), La Paz 23096, México

² CONAHCYT-Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), La Paz 23096, México

*Autor de correspondencia: E-mail: marco.hdz.dedios@gmail.com



Abstract

The study analyzes current knowledge on how different sources of macronutrients and functional additives influence the reproductive performance of marine fish, particularly carnivorous species. The aim was to identify the most relevant macronutrients and functional additives with the potential to improve reproductive performance. Research evaluating specialized diets was reviewed, with emphasis on the nutritional needs of broodstock, as well as the use of commercial and experimental diets and their influence on viability, hatching, and larval survival after supplementation with different nutritional compounds. The analysis suggests that there is no single macronutrient or functional additive that is universally effective for all species. However, the benefits of proteins, amino acids, fatty acids, vitamins, and carotenoids in the nutrition of broodstocks, as they have been shown to improve viability, hatching rates, and survival in captive conditions. This highlights the importance of customizing diets with these nutrients according to the specific needs of each species and cultivation conditions.

Keywords

Nutrition; Functional additives; Macronutrients; Reproductive performance.

Introducción

Los peces reproductores desempeñan un papel crucial en la industria acuícola, ya que son los responsables de generar la siguiente generación de peces destinados a la producción comercial. No obstante, al mantenerse en condiciones de cautiverio, su desempeño reproductivo¹ puede verse afectado por diversos factores como el manejo del ambiente, el estrés, las enfermedades y la calidad de la dieta, lo que conduce a una variabilidad en los resultados en cuanto a la eficacia de la reproducción. Por lo tanto, para evaluar este desempeño se emplean indicadores clave como la viabilidad de los huevos², el éxito de la eclosión³ y la supervivencia de las larvas⁴. Estos parámetros son esenciales, ya que influyen directamente en el éxito de los programas de cría y en la sostenibilidad de las poblaciones bajo manejo acuícola.

¹ Capacidad de producir descendencia de calidad.

² Capacidad para desarrollar un embrión sano que pueda crecer hasta convertirse en una larva.

³ Porcentaje de huevos fertilizados que logran desarrollar un embrión viable.

⁴ Proporción de crías que sobreviven en los primeros días después de la eclosión.

Para mejorar la salud y el éxito reproductivo de los peces reproductores es esencial asegurar una dieta rica en macronutrientes, como proteínas y lípidos (Izquierdo *et al.*, 2001). Dentro de los lípidos, los ácidos grasos son especialmente importantes porque aportan una gran cantidad de energía necesaria para respaldar las funciones metabólicas y reproductivas de los peces (Costa-Pinto y Gantner, 2020; Izquierdo *et al.*, 2001). Sin embargo, es importante complementar estos macronutrientes con aditivos funcionales, como carotenos, vitaminas y aminoácidos, para optimizar el rendimiento reproductivo en peces marinos carnívoros (Hernández-de Dios *et al.*, 2022; Figura 1.

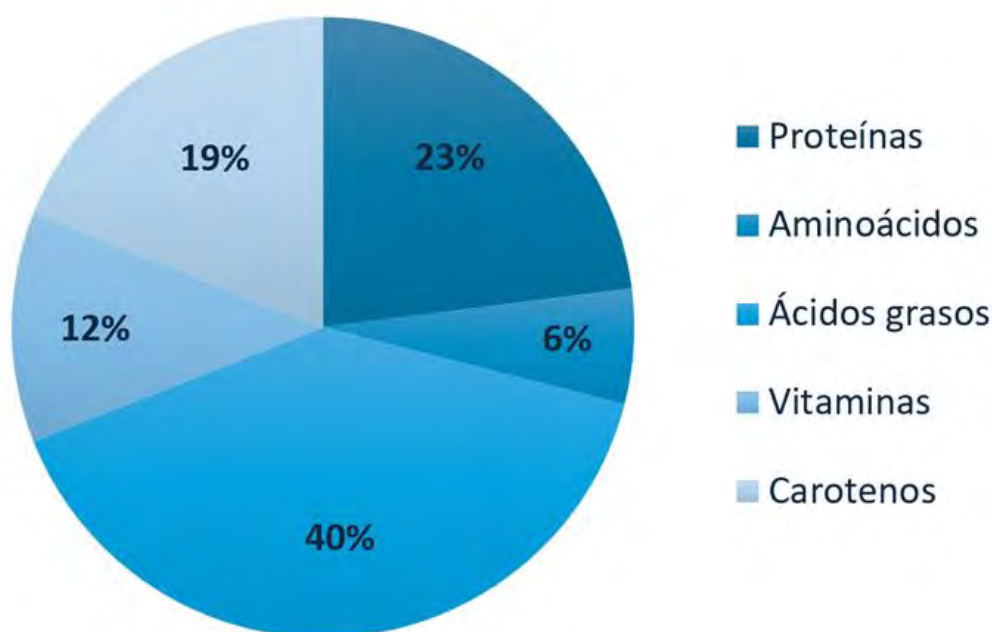


Figura 1. Proporción de macronutrientes y aditivos funcionales más utilizados en la acuicultura para mejorar el rendimiento reproductivo en peces marinos. Datos adaptados de Hernández-de Dios *et al.* (2022).

Los aditivos funcionales son sustancias que, aunque se agregan en pequeñas cantidades, van más allá de solo cubrir necesidades nutricionales ya que también mejoran la salud, el crecimiento y la reproducción de los organismos (Yadav *et al.*, 2021). A diferencia de los aditivos alimentarios, que se usan principalmente para mejorar la conservación, el sabor o la apariencia de los alimentos, los aditivos funcionales tienen un impacto directo en el bienestar y el rendimiento biológico de los organismos (de Sanidad y Barberá Mateos, 2011; Yadav *et al.*, 2021). La falta prolongada o ausencia de estas sustancias puede provocar problemas de salud, menor crecimiento y un bajo rendimiento reproductivo (Izquierdo *et al.*, 2001; Yadav *et al.*, 2021).



El objetivo de este estudio fue analizar cómo los macronutrientes y aditivos funcionales en la dieta afectan a peces marinos reproductores, como la dorada (*Sparus aurata*), el medregal coronado (*Seriola dumerili*), el medregal japonés (*Seriola quinqueradiata*), el besugo rojo (*Pagrus major*), el pargo común (*Pagrus pagrus*) y la lubina (*Dicentrarchus labrax*). Se presta especial atención en cómo influyen en la calidad reproductiva de estos peces, evaluando factores como la viabilidad de los huevos, el éxito de la eclosión y la supervivencia de las larvas.

Importancia de las proteínas para el rendimiento reproductivo

Las proteínas son esenciales para el crecimiento del cuerpo, la reparación de tejidos dañados, la producción de enzimas⁵ y hormonas⁶, y para mantener el sistema inmunológico funcionando correctamente. Además, juegan un papel clave en casi todos los procesos vitales del organismo como la formación de nuevas células y el movimiento muscular (Kelly *et al.*, 2007).

En el caso de los peces, las proteínas son uno de los nutrientes más importantes en su alimentación, ya que son clave para su desarrollo desde el nacimiento hasta la reproducción (Council, 2011; Hepher, 1988; Oliva-Teles, 2012). La cantidad de proteínas que requieren los peces varía según factores como la disponibilidad de fuentes proteicas, la cantidad de energía en su dieta y la temperatura del agua (Hart, 1990). Una alimentación adecuada en proteínas les permite a los organismos formar lipoproteínas⁷, hormonas y enzimas esenciales para la producción de óvulos y espermatozoides, jugando un rol crucial en la calidad de los huevos y en la supervivencia de las crías (Luquet y Watanabe, 1986). En este contexto, se ha demostrado que una dieta rica en proteínas mejora la maduración sexual de los peces, el desove y la tasa de eclosión (Hernández-de Dios *et al.*, 2022; Zupa *et al.*, 2017). En el Cuadro 1 se resumen algunos ejemplos de diferentes fuentes de proteínas utilizadas en las dietas de peces reproductores, analizando el desempeño reproductivo. Para ello, los datos analizados de tasas de viabilidad, eclosión y supervivencia se clasificaron de la siguiente manera:

- Menos del 25 %: Se considera un rendimiento deficiente, lo que indica que las condiciones reproductivas y nutricionales no son adecuadas para la producción exitosa de descendencia.
- Entre el 26 % y el 50 %: Se clasifica como regular, lo que sugiere que hay algunas deficiencias, pero que aún es posible obtener descendencia en cantidades moderadas.

⁵ Proteína que acelera las reacciones químicas en los organismos, facilitando procesos vitales como la digestión y la producción de energía.

⁶ Sustancia química que viaja en la sangre para indicar a las células qué funciones realizar.

⁷ Moléculas que transportan grasas en la sangre.

- Entre el 51 % y el 75 %: Se considera bueno, reflejando un rendimiento reproductivo satisfactorio con resultados generalmente positivos en las etapas de viabilidad, eclosión y supervivencia.
- Entre el 76 % y el 100 %: Se clasifica como excelente, indicando condiciones óptimas de reproducción con altos índices de viabilidad, eclosión exitosa y supervivencia larval.

Este mismo criterio de clasificación fue utilizado para los Cuadros 2 y 3, con el fin de analizar y comparar de manera consistente el desempeño reproductivo. La elección de la fuente de proteína ideal para los peces depende de las necesidades específicas de cada especie. No obstante, en términos generales se ha comprobado que alimentos ricos en proteínas y nutrientes como el krill, la harina de calamar y el pescado crudo, mejoran significativamente el rendimiento reproductivo de los peces marinos. Estas fuentes suelen ser más efectivas que los piensos comerciales o aquellos hechos a base de harina de soya.

Cuadro 1. Uso, beneficios e impacto de diferentes fuentes de proteína en el rendimiento reproductivo de peces marinos

Fuente	Mejor Beneficio	Rendimiento Reproductivo	Consideraciones	Referencia
Pez crudo	Viabilidad	Regular	Disponibilidad limitada de algunas especies	Mushiake <i>et al.</i> , 1995; Watanabe <i>et al.</i> , 1984; 1996
Harina de pez	Viabilidad	Deficiente	Variabilidad en calidad y origen de la harina	Cerdá <i>et al.</i> , 1994; Mushiake <i>et al.</i> , 1995; Roo <i>et al.</i> , 2014
Harina de sepia	Supervivencia larval	Excelente	Difícil de obtener	Watanabe <i>et al.</i> , 1991
Krill	Eclosión	Bueno	No siempre disponible	Watanabe <i>et al.</i> , 1985
Harinas	Eclosión	Bueno	Necesario complementar con harinas o aceites de origen animal	Emata y Borlongan, 2003
Pez-calamar	Viabilidad	Bueno	Puede haber variación dependiendo del pez suministrado	Abrehouch <i>et al.</i> , 2010
Calamar-mejillón	Supervivencia larval	Regular	Puede no ser tan nutritivo como otras fuentes	Roo <i>et al.</i> , 2014
Harina de calamar	Eclosión	Bueno	No siempre disponible	Roo <i>et al.</i> , 2014
Harina de calamar y pez	Viabilidad	Excelente	Variación dependiendo del origen de la harina	Sarih <i>et al.</i> , 2019



Papel de los aminoácidos en el desempeño reproductivo

Los aminoácidos son moléculas pequeñas que se combinan para formar proteínas esenciales para el cuerpo. Algunos aminoácidos son no esenciales, lo que significa que el organismo puede producirlos, mientras que los esenciales deben ser obtenidos a través de la alimentación (Blanco y Blanco, 2017). En los peces los aminoácidos son fundamentales para el crecimiento embrionario y larval y son clave para la formación de estructuras corporales y la síntesis de proteínas necesarias para su desarrollo saludable (Finn *et al.*, 2010; Kamler, 2008; Wright y Fyhn, 2001).

Los aminoácidos libres, como la taurina, no solo favorecen la flotabilidad y retención de agua en los huevos, sino que también contribuyen a la correcta oxigenación de los embriones, especialmente en especies marinas (Cerdá *et al.*, 2007; Finn *et al.*, 2002). La taurina es uno de los aminoácidos libres más abundantes y cumple funciones esenciales en diversos procesos fisiológicos, como la regulación del sistema nervioso, la modulación del metabolismo de las grasas, la absorción de calcio y la osmorregulación, ayudando a mantener el equilibrio de agua y sales en el organismo (Salze y Davis, 2015; Sampath *et al.*, 2020), con un papel crucial en la eliminación de toxinas (Divakaran, 2006). Debido a estas propiedades, la taurina se ha convertido en uno de los aminoácidos más utilizados en la alimentación de peces marinos reproductores (Hernández-de Dios *et al.*, 2022).

La deficiencia de taurina en la dieta puede afectar la salud de los peces, reduciendo el crecimiento, la eficiencia alimentaria y aumentando el riesgo de enfermedad hepática y mortalidad (Satriyo *et al.*, 2017; Takagi *et al.*, 2006; 2008). En cuanto a la reproducción, la taurina y la histidina (aminoácido esencial) han demostrado mejorar la viabilidad de los huevos, su eclosión y la supervivencia de las crías. Especies como el medregal cola amarilla (*Seriola lalandi*), el medregal coronado (*Seriola dumerili*) y el medregal japonés (*Seriola quinqueradiata*) han mostrado mejoras en estos parámetros cuando estos aminoácidos se incluyen en la dieta (Figura 2). Se ha observado que la taurina puede beneficiar la fertilidad y mejorar la calidad del esperma en algunas especies de peces (Li *et al.*, 2022). Sin embargo, aunque la inclusión de taurina y otros aminoácidos es crucial para el rendimiento reproductivo de los peces, aún se necesita más investigación para comprender su impacto en la reproducción de peces marinos.

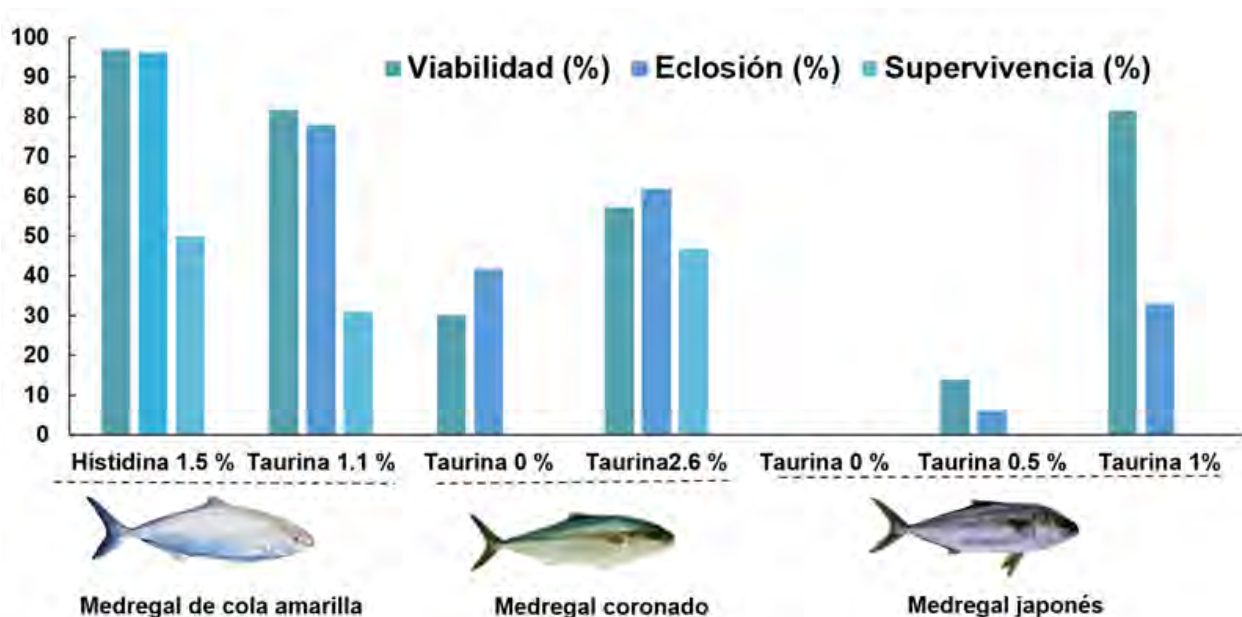


Figura 2. Impacto de la suplementación de taurina e histidina en la viabilidad, eclosión y supervivencia de tres especies de medregal.

Importancia de los lípidos en la mejora del desempeño reproductivo

Los lípidos son macronutrientes esenciales que desempeñan funciones clave en el organismo (Izquierdo *et al.*, 2001). Actúan como elementos estructurales de las membranas celulares y a nivel metabólico sirven como reservas de energía, precursores hormonales y participan en vías de señalización⁸; contribuyendo también a la digestión y la salud general (Fahy *et al.*, 2011). Entre los tipos de lípidos, los fosfolípidos⁹, esteroides¹⁰ y ácidos grasos son fundamentales, siendo estos últimos especialmente importantes en la alimentación de los peces (Hernández-de Dios *et al.*, 2022).

Dentro de los ácidos grasos esenciales, los omega-3 como el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el ácido docosahexaenoico (DHA), se encuentran principalmente en pescados grasos como el salmón y las sardinas. Por su parte, los omega-6, como el ácido linoleico (AL), están presentes en aceites vegetales como el de girasol (Fahy *et al.*, 2011; Tocher *et al.*, 2011). Debido a que los peces no pueden producir estos ácidos grasos por sí mismos, deben obtenerlos a través de su dieta. La cantidad y tipo de estos ácidos grasos esenciales influye significativamente en la reproducción, el desarrollo de los embriones y su aporte energético (Izquierdo *et al.*, 2001). Son cruciales para transportar y almacenar

⁸ Procesos biológicos mediante los cuales las células se comunican entre sí y responden a estímulos externos.

⁹ Tipo de grasa que tiene una parte que se atrae al agua y otra que la repela.

¹⁰ Tipo de grasa que ayuda a que las células mantengan su forma y funcionamiento adecuados.



de estos ácidos grasos esenciales influye significativamente en la reproducción, el desarrollo de los embriones y su aporte energético (Izquierdo *et al.*, 2001). Son cruciales para transportar y almacenar grasas en las gónadas, permitir que los ovocitos¹¹ accedan a las reservas de grasa y mantener los lípidos en la yema del huevo, lo que favorece un desarrollo reproductivo saludable y la formación de células (Izquierdo *et al.*, 2001; Ohs *et al.*, 2013; Sharma y Gangwar, 2018).

Especies de peces carnívoros como el pargo (*Pagrus sp.*), la dorada (*Sparus sp.*) y el medregal (*Seriola sp.*), requieren suplementos de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga (LC-PUFA) debido a su incapacidad para convertir eficientemente ciertos ácidos grasos en EPA y DHA (Hernández-de Dios *et al.*, 2022). Es vital que su dieta incluya estos ácidos grasos para cubrir sus necesidades energéticas, promover la producción de gametos y mejorar la calidad de las larvas (Izquierdo *et al.*, 2001; Luquet y Watanabe, 1986; Sharma y Gangwar, 2018). En el Cuadro 2 se presentan algunas fuentes de lípidos utilizadas en las dietas de los reproductores.

Cuadro 2. Aplicación y beneficios de diversas fuentes de aceite y su efecto en el rendimiento reproductivo de peces marinos.

Fuente	Mejor Beneficio	Rendimiento Reproductivo	Consideraciones	Referencia
Aceite de pescado	Eclosión	Bueno	Variabilidad en calidad y origen del pescado	Almansa <i>et al.</i> , 1999; Fernández-Palacios <i>et al.</i> , 1995
Aceite de calamar	Eclosión	Regular	Accesibilidad limitada	Fernández-Palacios <i>et al.</i> , 1997
Aceite hígado de bacalao	Viabilidad	Regular	Accesibilidad limitada	Rodríguez <i>et al.</i> , 1998
Aceite de oliva y lino	Viabilidad	Deficiente	No recomendable para peces carnívoros	Rodríguez <i>et al.</i> , 1998
Aceite de canola	Eclosión	Bueno	Cantidad moderada de ácidos grasos omega-3	Ferosekhan <i>et al.</i> , 2020
Aceite vegetal	Eclosión	Regular	Alto contenido de omega-6	Xu <i>et al.</i> , 2019
Aceite de maíz y pescado	Viabilidad	Regular	Entre más aceite vegetal se use, menor rendimiento	Bell <i>et al.</i> , 1997
Aceite de girasol y pescado	Supervivencia larval	Bueno	Entre más aceite vegetal se use, menor rendimiento	Zakeri <i>et al.</i> , 2009
Aceite de girasol	Supervivencia larval	Regular	Deficiente en omega-3	Zakeri <i>et al.</i> , 2011
Aceite de hongo	Supervivencia larval	Regular	Faltan estudios	Stuart <i>et al.</i> , 2018
Oleína de palma	Eclosión	Bueno	Rico en omega-6	Furuita <i>et al.</i> , 2000
Desperdicio de pez	Viabilidad	Deficiente	Riesgo de infecciones bacterianas	Navas <i>et al.</i> , 1997
Aceite de linaza y pescado	Viabilidad	Bueno	Entre más aceite vegetal se use, menor rendimiento	Sarih <i>et al.</i> , 2020
Aceite visceral de abadejo	Supervivencia larval	Excelente	Rico en omega-3	Furuita <i>et al.</i> , 2000

En general, los ácidos grasos de origen animal son más adecuados para los peces carnívoros, ya que su sistema digestivo está diseñado para procesar y aprovechar mejor las proteínas y grasas de origen animal (Villasante *et al.*, 2019). Sin embargo, ciertos ácidos grasos de origen vegetal, como los presentes en aceites de canola y oleína de palma, también pueden ser útiles en la dieta de los peces. Algunos alimentos comerciales combinan ácidos grasos de origen animal y vegetal para asegurar una nutrición equilibrada. Es importante seguir las recomendaciones específicas de alimentación según la especie de pez y optar por alimentos de alta calidad que aporten los nutrientes necesarios para su salud y bienestar.

Implementación de vitaminas y carotenos

Para promover el crecimiento, la reproducción y la salud de los peces es crucial que su dieta incluya vitaminas esenciales, ya que son compuestos orgánicos vitales que los peces no pueden producir por sí mismos y sólo pueden obtenerse a través de la dieta. Las principales vitaminas son: A, C y E (Webster y Lim, 2001) (Cuadro 3).

La deficiencia de vitaminas es una de las principales causas de problemas en la acuicultura que pueden llevar a enfermedades en la piel, deformidades óseas, hinchazón, problemas en los ojos y branquias, hemorragias, enfermedades hepáticas y retraso en el crecimiento (Council, 2011). Un ejemplo es la vitamina C, que juega un papel crucial en la reproducción y en la formación del saco vitelino¹², además de proteger al esperma durante la formación y fertilización (Izquierdo *et al.*, 2001; Sandnes, 1991). De igual manera, la vitamina A es fundamental para la puesta de huevos, el desarrollo de las larvas, la maduración de los órganos reproductores y es clave durante el desarrollo del embrión (Volkoff y London, 2018).

Por su parte, los carotenos son pigmentos naturales que además de proporcionar color, desempeñan un papel importante en la salud de los animales al actuar como antioxidante¹³, ayudando a neutralizar los radicales libres¹⁴ (Volkoff y London, 2018). La capacidad antioxidante de los carotenos varía según su estructura y el tipo de radical libre que deben neutralizar (Chew, 1995).

¹¹ Célula inmadura que se convierte en huevo durante el proceso de maduración.

¹² Estructura que contiene nutrientes esenciales para el embrión.

¹³ Sustancia que protege las células del daño causado por los radicales libres.

¹⁴ Moléculas inestables producidas por el cuerpo que pueden dañar las células.



Los carotenos juegan un papel clave en la reproducción de los peces, protegiendo las células reproductivas, mejorando la calidad de los huevos, la eclosión y la supervivencia de las larvas. Los carotenos provitamina A, principalmente alfa y beta carotenos, contribuyen a la formación de vitamina A, esencial para el desarrollo embrionario y la formación de tejidos en las primeras etapas de vida (Paripatananont *et al.*, 1999; Thompson *et al.*, 1994).

Uno de los carotenos más utilizados es la astaxantina, ya que ha demostrado mejorar la calidad de los huevos al protegerlos de daños oxidativos, lo que se asocia con una mayor tasa de eclosión y una mejor supervivencia de las larvas, favoreciendo su crecimiento y resistencia a enfermedades en las primeras etapas de vida (Watanabe y Miki, 1993). En el Cuadro 3 se presentan algunos ejemplos de las fuentes de carotenos utilizadas en las dietas de los reproductores.

Cuadro 3. Impacto del uso de vitaminas y carotenoides en el rendimiento reproductivo de peces marinos.

Fuente	Mejor Beneficio	Rendimiento Reproductivo	Consideraciones	Referencia
Vitaminas				
Vitamina E	Superviven cia larval	Bueno	Variación según la forma de suplementación	Mangor-Jensen <i>et al.</i> , 1994; Watanabe <i>et al.</i> , 1991
Vitamina C	Viabilidad	Deficiente	Necesidad de estudios adicionales	Mangor-Jensen <i>et al.</i> , 1994
Vitamina A	Viabilidad	Excelente	Variación según la forma de suplementación	Furuita <i>et al.</i> , 2003
Carotenos				
Astaxantina	Viabilidad	Regular	Efectividad variable en diferentes estudios	Verakunpiriya <i>et al.</i> , 1997
<i>Spirulina</i> sp.	Superviven cia larval	Deficiente	Se necesita más investigación	Vassallo-Agius <i>et al.</i> , 1999
Calamar y camarón	Superviven cia larval	Bueno	Puede ser costoso en comparación con otras fuentes	Verakunpiriya <i>et al.</i> , 1997b
Calamar, camarón, pez	Viabilidad	Excelente	Rico en carotenos y ácidos grasos	Vassallo-Agius <i>et al.</i> , 1999
Paprica	Mejora la eclosión	Bueno	Necesidad de estudios adicionales	Vassallo-Agius <i>et al.</i> , 2002
Clorofila rosa	Viabilidad	Deficiente	Se necesita más investigación	Sawanboonchun <i>et al.</i> , 2008
Krill	Eclosión	Regular	Accesibilidad limitada	Hansen <i>et al.</i> , 2016; Verakunpiriya <i>et al.</i> , 1996; Watanabe <i>et al.</i> , 1996

Discusión

La selección del nutriente adecuado para mejorar el rendimiento reproductivo en peces marinos debe considerar tanto la calidad como la fuente del macronutriente o aditivo funcional. Es crucial reconocer que la respuesta a estos nutrientes varía según la especie. La literatura científica señala que nutrientes como proteínas, aminoácidos, ácidos grasos, vitaminas y carotenos pueden influir positivamente en las tasas de viabilidad, eclosión y supervivencia larval.

Sin embargo, los datos sugieren que no existe un aditivo universalmente eficaz, ya que los efectos dependen de los requerimientos específicos de cada especie. Por ejemplo, se ha observado que la inclusión de harina de sepia como fuente proteica en la dieta de *Pagrus major* mejora el rendimiento reproductivo en comparación con otras fuentes proteicas, como la harina de pescado blanco o el krill (Watanabe *et al.*, 1984; 1991). De manera similar, en *Dicentrarchus labrax* el uso de la misma fuente proteica a diferentes concentraciones benefició la calidad de la puesta, siendo superior cuando se emplearon concentraciones altas de proteínas (Cerdá *et al.*, 1994).

En cuanto a la suplementación con aminoácidos, la taurina y la histidina son de los más utilizados actualmente, mostrando un impacto positivo en el rendimiento reproductivo de los peces marinos. La taurina ha demostrado mejorar la calidad de los huevos, el éxito de la eclosión y la fecundidad, como se observó en *Seriola quinqueradiata* y *S. dorsalis*, donde se lograron mejoras significativas en la reproducción al añadir taurina en concentraciones de 10 y 20 g/kg en la dieta (Matsunari *et al.*, 2006; Sarih *et al.*, 2019). En contraste, la histidina resultó más eficaz que la taurina en las tasas de eclosión y supervivencia en *S. dumerili*, lo que resalta la importancia de seleccionar los aminoácidos adecuados para optimizar el rendimiento reproductivo (Sarih *et al.*, 2019).

Por su parte, los ácidos grasos son esenciales no sólo como fuente de energía, sino también para la formación de gónadas, huevos y esperma, lo que favorece el éxito reproductivo (Izquierdo *et al.*, 2001). En *Dicentrarchus labrax* la combinación de aceites de pescado y girasol resulta más beneficiosa que las dietas basadas exclusivamente en harina de pescado, mejorando la viabilidad y supervivencia larval (Cerdá *et al.*, 1994). En *Sparus aurata*, la incorporación de ácidos grasos omega-3 es clave para optimizar la viabilidad y la tasa de eclosión (Ferosekhan *et al.*, 2020).

El origen de los ácidos grasos es un factor significativo, ya que puede influir directamente en el rendimiento reproductivo de los peces. Por ejemplo, aunque los aceites vegetales como el de canola han mostrado beneficios en la eclosión, su impacto sobre la viabilidad es limitado (Turkmen *et al.*,



2020; Xu et al., 2019). En cambio, los aceites de origen animal, como los de sardina y calamar, mejoran significativamente tanto la viabilidad como la tasa de eclosión de los huevos (Fernández-Palacios et al., 1997).

Dentro del grupo de vitaminas destacan la A y E, que son esenciales para la reproducción en los peces (Webster, 2001). Estas vitaminas juegan un papel crucial debido a sus propiedades antioxidantes, que favorecen la protección de los espermatozoides durante la espermatogénesis y la fertilización (Hernández-de Dios et al., 2022; Izquierdo et al., 2001). En *Pagrus major* la incorporación de vitamina E mejora la viabilidad de los huevos, aunque con tasas de eclosión relativamente bajas (Watanabe et al., 1991). Esto sugiere que la vitamina E podría tener un papel protector más relevante en las primeras etapas del desarrollo embrionario. En contraste en *Paralichthys olivaceus*, la vitamina A mejora significativamente tanto la viabilidad como la eclosión de las larvas (Furuita et al., 2000; 2001; 2003).

Por último, los carotenos, especialmente la astaxantina, juegan un papel clave en la protección antioxidante de los huevos, lo que contribuye a mejorar su calidad y la tasa de eclosión (Verakunpiriya et al., 1997). Sin embargo, el origen de la astaxantina es un factor importante por considerar, ya que se ha demostrado que la astaxantina sintética añadida a la dieta de *S. quinqueradiata* tiene una menor efectividad en la mejora de la eclosión y la supervivencia larval, en comparación con la astaxantina proveniente de fuentes animales como el krill, que también es rico en carotenos, especialmente en beta-caroteno (Verakunpiriya et al., 1996; 1997). Esta diferencia sugiere que la forma natural de los carotenos podría ser más biodisponible o tener una mayor eficacia biológica. No obstante, los resultados pueden variar según la fuente de origen animal. Por ejemplo, en *Pagrus major*, el suministro de harina de sepia, rica en astaxantina, resultó ser más eficaz que el krill en la mejora de las tasas de eclosión y supervivencia larval (Watanabe et al., 1984).

Perspectivas y consideraciones

Es fundamental reconocer la importancia de una nutrición adecuada en la reproducción de peces marinos dentro de la acuicultura. El uso adecuado de los macronutrientes y aditivos funcionales de calidad ha demostrado ser clave para mejorar la reproducción en diferentes especies de peces carnívoros. Por ello, los productores acuícolas deben adoptar prácticas de alimentación que se ajusten a las necesidades específicas de cada especie, respaldadas por la investigación científica más reciente; así como, tener cuidado en elegir la fuente más adecuada del nutriente para optimizar el rendimiento reproductivo. De cara al futuro, es crucial que la investigación continúe identificando y evaluando nuevos aditivos que puedan ofrecer beneficios adicionales, además de optimizar los que ya se utilizan, investigando su impacto en más especies y en distintas condiciones de cultivo, lo que permitirá adaptar las recomendaciones a cada entorno productivo.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo a esta investigación a través de la subvención CONAHCYT-PRONACES 321279 FOP07. Al proyecto de Recursos Propios con la empresa Kampachi Farms México. Además, agradecen al personal técnico Roxana Bertha Inohuye Rivera, Pedro Uriarte Ureta, Juan Carlos Pérez Urbiola, Pablo Monsalvo Spencer, Carlos Ernesto Ceseña, al departamento de mantenimiento electromecánico del CIBNOR. A los Ingenieros Ramón Altamirano Cobos, René Gaxiola Márquez, Francisco Aguillón León, Julio Reyes García y Víctor Ormart. Al departamento de mantenimiento y servicios generales Ingenieros Juan J Mandujano García, Jessica Calvillo González, Rafael Palomeque Morales, Alfonso Fernández García. Al personal administrativo en general. Sin el apoyo de todo el equipo del CIBNOR no sería posible realizar la investigación con los peces marinos y toda su participación es indispensable para la realización de futuras investigaciones. Agradecimiento especial a Eunice D. Rodríguez Rafael por sus comentarios a este manuscrito.



Referencias

- Abrehouch, A., A. Ait Ali, K. Chebbaki, H. Akharbach y M. Idaomar. 2010. Effect of diet (fatty acid and protein) content during spawning season on fertility, eggs and larvae quality of common porgy (*Pagrus pagrus*, Linnaeus 1758). *Agriculture and Biology Journal of North America* 1(3): 175-184. <https://doi.org/10.5251/abjna.2010.1.3.175.184>
- Almansa, E., M.J. Pérez, J.R. Cejas, P. Badía, J.E. Villamandos y A. Lorenzo. 1999. Influence of broodstock gilthead seabream (*Sparus aurata* L.) dietary fatty acids on egg quality and egg fatty acid composition throughout the spawning season. *Aquaculture* 170(3): 323-336. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(98\)00415-3](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(98)00415-3)
- Bañuelos-Vargas, I., L.M. López, A. Pérez-Jiménez y H. Peres. 2014. Effect of fishmeal replacement by soy protein concentrate with taurine supplementation on hepatic intermediary metabolism and antioxidant status of totoaba juveniles (*Totoaba macdonaldi*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology* 170: 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2014.01.003>
- Blanco, A. y G. Blanco. 2017. Amino Acid Metabolism. In: A. Blanco y G. Blanco (Eds.), *Medical Biochemistry*. Academic Press. 367–399 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803550-4.00016-1>
- Bell, J.G., B.M. Farndale, M.P. Bruce, J.M. Navas y M. Carillo. 1997. Effects of broodstock dietary lipid on fatty acid compositions of eggs from sea bass (*Dicentrarchus labrax*). *Aquaculture* 149(1): 107-119. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(96\)01436-6](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01436-6)
- Cerdá, J., M. Fabra y D. Raldúa. 2007. Physiological and molecular basis of fish oocyte hydration. Springer, Dordrecht. 349-396 pp. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6235-3_12
- Cerdá, J., M. Carrillo, S. Zanuy, J. Ramos y M. de la Higuera. 1994. Influence of nutritional composition of diet on sea bass, *Dicentrarchus labrax* L., reproductive performance and egg and larval quality. *Aquaculture* 128(3-4): 345-361. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(94\)90322-0](https://doi.org/10.1016/0044-8486(94)90322-0)
- Chew, S.F., J.M. Wilson, Y.K. Ip y D.J. Randall. 2005. Nitrogen excretion and defense against ammonia toxicity. *Fish Physiology* 21: 307-395. [https://doi.org/10.1016/S1546-5098\(05\)21008-7](https://doi.org/10.1016/S1546-5098(05)21008-7)
- Chew, B.P. 1995. Antioxidant vitamins affect food animal immunity and health. *The Journal of Nutrition* 125: 1804S-1808S. https://doi.org/10.1093/jn/125.suppl_6.1804S
- Costa-Pinto, R. y D. Gantner. 2020. Macronutrients, minerals, vitamins and energy. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine* 21(3): 157-161. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2019.12.006>

- Council, N. R. 2011. Nutrient Requirements of Fish and Shrimp. Washington, DC: The National Academies Press. 392 pp. <https://doi.org/10.17226/13039>
- de Sanidad, C.D.M.C. y J.M. Barberá Mateos. 2011. Alimentos funcionales: aproximación a una nueva alimentación. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lis-44771>
- Divakaran, S. 2006. Taurine: an amino acid rich in fish meal. Avances en Nutrición Acuícola. 333–335 pp.
- Emata, A.C. y I.G. Borlongan. 2003. A practical broodstock diet for the mangrove red snapper, *Lutjanus argentimaculatus*. Aquaculture 225(1): 83-88. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00279-5](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00279-5)
- Fahy, E., D. Cotter, M. Sud y S. Subramaniam. 2011. Lipid classification, structures and tools. Biochimica et Biophysica Acta 1811(11): 637-647. <https://doi.org/10.1016/j.bbaliip.2011.06.009>
- Fernández-Palacios, H., M. Izquierdo, L. Robaina, A. Valencia, M. Salhi y D. Montero. 1997. The effect of dietary protein and lipid from squid and fish meals on egg quality of broodstock for gilthead seabream (*Sparus aurata*). Aquaculture 148(2-3): 233-246. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(96\)01312-9](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01312-9)
- Fernández-Palacios, H., M.S. Izquierdo, L. Robaina, A. Valencia, M. Salhi y J.M. Vergara. 1995. Effect of n – 3 HUFA level in broodstock diets on egg quality of gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.). Aquaculture 132(3): 325-337. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(94\)00345-0](https://doi.org/10.1016/0044-8486(94)00345-0)
- Ferosekhan, S., H. Xu, S. Turkmen, A. Gómez, J.M. Afonso, R. Fontanillas, G. Rosenlund, S. Kaushik y M. Izquierdo. 2020. Reproductive performance of gilthead seabream (*Sparus aurata*) broodstock showing different expression of fatty acyl desaturase 2 and fed two dietary fatty acid profiles. Scientific Reports 10(1): 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72166-5>
- Finn, R.N. y H.J. Fyhn. 2010. Requirement for amino acids in ontogeny of fish. Aquaculture Research 41(5): 684-716. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02220.x>
- Finn, R.N., G.C. Østby, B. Norberg y H.J. Fyhn. 2002. In vivo oocyte hydration in Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*); proteolytic liberation of free amino acids, and ion transport, are driving forces for osmotic water influx. Journal of Experimental Biology 205(2): 211-224. <https://doi.org/10.1242/jeb.205.2.211>
- Furuita, H., H. Tanaka, T. Yamamoto, M. Shiraishi y T. Takeuchi. 2000. Effects of n-3 HUFA levels in broodstock diet on the reproductive performance and egg and larval quality of the Japanese



- flounder, *Paralichthys olivaceus*. Aquaculture 187(3): 387-398. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(00\)00319-7](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(00)00319-7)
- Furuita, H., H. Tanaka, T. Yamamoto, M. Shiraishi y T. Takeuchi. 2001. Effects of high dose of vitamin A on reproduction and egg quality of Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*. Fisheries Science 67(4): 606-613. <https://doi.org/10.1046/j.1444-2906.2001.00296.x>
- Furuita, H., H. Tanaka, T. Yamamoto, N. Suzuki y T. Takeuchi. 2003. Supplemental effect of vitamin A in diet on the reproductive performance and egg quality of the Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*. Aquaculture Research 34(6): Article 6. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.2003.00831.x>
- Fyhn, H.J. 1993. Multiple functions of free amino acids during embryogenesis in marine fishes. University of Bergen, Norway. Physiological and biochemical aspects of fish development, 299-308 pp.
- Hall, T. E. 2020. Pattern formation. In Fish larval physiology. CRC Press. 3-25 pp.
- Hansen, Ø.J., V. Puvanendran y R. Bangera. 2016. Broodstock diet with water and astaxanthin improve condition and egg output of brood fish and larval survival in Atlantic cod, *Gadus morhua* L. Aquaculture Research 47(3): 819-829. <https://doi.org/10.1111/are.12540>
- Hart, N.H. 1990. Fertilization in teleost fishes: mechanisms of sperm-egg interactions. International Review of Cytology 121: 1-66. [https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(08\)60658-0](https://doi.org/10.1016/S0074-7696(08)60658-0)
- Hepher, B. 1988. Nutrition of Pond Fishes. Cambridge University Press. 385 pp. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511735455>
- Hernández-de Dios, M.A., D. Tovar-Ramírez, D. Maldonado García, M.A. Galaviz-Espinoza, M. Spanopoulos Zarco y M.C. Maldonado-García. 2022. Functional additives as a boost to reproductive performance in marine fish: A review. Fishes 7(5): Article 5. <https://doi.org/10.3390/fishes7050262>
- Izquierdo, M.S., H. Fernández-Palacios y A.G.J. Tacon. 2001. Effect of broodstock nutrition on reproductive performance of fish. Aquaculture 197(1): 25-42. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00581-6](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00581-6)
- Kelley, K.W., D.A. Weigant y R. Kooijman. 2007. Protein hormones and immunity. Brain, Behavior, and Immunity 21(4): 384-392. <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2006.11.010>
- Kamler, E. 2008. Resource allocation in yolk-feeding fish. Reviews in Fish Biology and Fisheries 18: 143-200. <https://doi.org/10.1007/s11160-007-9070-x>

- Kumar, P., Y. Prasad, A.K. Patra, R. Ranjan, D. Swarup, R.C. Patra y S. Pal. 2009. Ascorbic acid, garlic extract and taurine alleviate cadmium-induced oxidative stress in freshwater catfish (*Clarias batrachus*). Science of The Total Environment 407(18): 5024-5030. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.05.030>
- Li, L., H.-Y. Liu, S.Q. Xie, P.-Y. Zhang y Z.-C. Yang. 2022. Effects of taurine supplementation on growth performance and feed utilization in aquatic animals: A meta-analysis. Aquaculture 551: 737896. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.737896>
- Luquet, P. y T. Watanabe. 1986. Interaction nutrition-reproduction in fish. Fish Physiology and Biochemistry 2(1-4): 121-129. <https://doi.org/10.1007/BF02264080>
- Mangor-Jensen, A., J. Chr. Holm, G. Rosenlund, Ø. Lie y K. Sandnes. 1994. Effects of dietary vitamin C on maturation and egg quality of cod *Gadus morhua* L. Journal of the World Aquaculture Society 25(1): 30-40. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1994.tb00801.x>
- Matsunari, H., K. Hamada, K. Mushiake y T. Takeuchi. 2006. Effects of taurine levels in broodstock diet on reproductive performance of yellowtail *Seriola quinqueradiata*. Fisheries Science 72(5): 955-960. <https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2006.01243.x>
- Mushiake, K., K. Kawano, W. Verakunpiriya, T. Watanabe y I. Hasegawa. 1995. Egg collection from broodstocks of yellowtail fed commercial soft dry pellets. Nippon Suisan Gakkaishi 61(4): 540-546. <https://doi.org/10.2331/suisan.61.540>
- Navas, J.M., M. Bruce, M. Thrush, B.M. Farndale, N. Bromage, S. Zanuy, M. Carrillo, J.G. Bell y J. Ramos. 1997. The impact of seasonal alteration in the lipid composition of broodstock diets on egg quality in the European sea bass. Journal of Fish Biology 51(4): 760-773. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1997.tb01997.x>
- Ohs, C.L., M.A. DiMaggio, S.W. Grabe, J.S. Broach, C.A. Watson, N.E. Breen y F.T. Barrows. 2013. Effects of increasing docosahexaenoic acid (DHA) and arachidonic acid (ARA) in brood diets of *Monodactylus sebae* on fecundity, egg and larval quality, and egg fatty acid composition. North American Journal of Aquaculture 75(2): 285-294. <https://doi.org/10.1080/15222055.2012.746248>
- Oliva-Teles, A. 2012. Nutrition and health of aquaculture fish. Journal of Fish Diseases 35(2): Article 2. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.2011.01333.x>
- Paripatananont, T., J. Tangtrongpaioj, A. Sailasuta y N. Chansue. 1999. Effect of astaxanthin on the pigmentation of goldfish *Carassius auratus*. Journal of the World Aquaculture Society 30(4): 454-460. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1999.tb00993.x>



- Rodríguez, C., J.R. Cejas, M.V. Martín, P. Badía, M. Samper y A. Lorenzo. 1998. Influence of n-3 highly unsaturated fatty acid deficiency on the lipid composition of broodstock gilthead seabream (*Sparus aurata* L.) and on egg quality. *Fish Physiology and Biochemistry* 18(2): 177-187. <https://doi.org/10.1023/A:1007750218840>
- Roo, J., H. Fernández-Palacios, C.M. Hernández-Cruz, A. Mesa-Rodríguez, D. Schuchardt y M. Izquierdo. 2014. First results of spawning and larval rearing of longfin yellowtail *Seriola rivoliana* as a fast-growing candidate for European marine finfish aquaculture diversification. *Aquaculture Research* 45(4): 689-700. <https://doi.org/10.1111/are.12007>
- Salze, G.P. y D.A. Davis. 2015. Taurine: A critical nutrient for future fish feeds. *Aquaculture* 437: 215-229. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.12.006>
- Salze, G.P., D.A. Davis, K. Stuart y M. Drawbridge. 2019. Effect of dietary taurine in the performance of broodstock and larvae of California yellowtail *Seriola dorsalis*. *Aquaculture* 511: 734262. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734262>
- Sandnes, K. 1991. Vitamin C in fish nutrition—A review. *Fisk.Dir. Skr., Ser. Ernering* 4(1): 3-32.
- Sarih, S., A. Djellata, H. Fernández-Palacios, R. Ginés, R. Fontanillas, G. Rosenlund, M. Izquierdo y J. Roo. 2020. Adequate n-3 LC-PUFA levels in broodstock diets optimize reproductive performance in GnRH injected greater amberjack (*Seriola dumerili*) equaling to spontaneously spawning broodstock. *Aquaculture* 520: 735007. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735007>
- Sarih, S., A. Djellata, J. Roo, C.M. Hernández-Cruz, R. Fontanillas, G. Rosenlund, M. Izquierdo y H. Fernández-Palacios. 2019. Effects of increased protein, histidine and taurine dietary levels on egg quality of greater amberjack (*Seriola dumerili*, Risso, 1810). *Aquaculture* 499: 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.09.011>
- Satriyo, T.B., M.A. Galaviz, G. Salze y L.M. López. 2017. Assessment of dietary taurine essentiality on the physiological state of juvenile *Totoaba macdonaldi*. *Aquaculture Research* 48(11): 5677-5689. <https://doi.org/10.1111/are.13391>
- Sawanboonchun, J., W.J. Roy, D.A. Robertson y J.G. Bell. 2008. The impact of dietary supplementation with astaxanthin on egg quality in Atlantic cod broodstock (*Gadus morhua*). *Aquaculture* 283(1): 97-101. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.06.024>
- Sharma, S. y M. Gangwar. 2018. Role of broodstock nutrition on fish reproductive performance. *Aqua Star* 3: 24-26.

- Stahl, W. y H. Sies. 2003. Antioxidant activity of carotenoids. *Molecular Aspects of Medicine* 24(6): 345-351. [https://doi.org/10.1016/S0098-2997\(03\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0098-2997(03)00030-X)
- Stuart, K., R. Johnson, L. Armbruster y M. Drawbridge. 2018. Arachidonic acid in the diet of captive yellowtail and its effects on egg quality. *North American Journal of Aquaculture* 80(1): 97-106. <https://doi.org/10.1002/naaq.10003>
- Takagi, S., H. Murata, T. Goto, M. Endo, H. Yamashita y M. Ukawa. 2008. Taurine is an essential nutrient for yellowtail *Seriola quinqueradiata* fed non-fish meal diets based on soy protein concentrate. *Aquaculture* 280(1): 198-205. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.05.012>
- Takagi, S., H. Murata, T. Goto, T. Ichiki, M. Endo, H. Hatate, T. Yoshida, T. Sakai, H. Yamashita y M. Ukawa. 2006. Efficacy of taurine supplementation for preventing green liver syndrome and improving growth performance in yearling red sea bream *Pagrus major* fed low-fishmeal diet. *Fisheries Science* 72(6): 1191-1199. <https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2006.01276.x>
- Terjesen, B.F. 2008. Nitrogen metabolism. Science Publishers, NH, USA. 263-302 pp.
- Thompson, I., T.C. Fletcher, D.F. Houlihan y C.J. Secombes. 1994. The effect of dietary vitamin A on the immunocompetence of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Fish Physiology and Biochemistry* 12(6): 513-523. <https://doi.org/10.1007/BF00004453>
- Tocher, D., D. Francis y K. Coupland. 2011. n-3 Polyunsaturated Fatty Acid-Rich Vegetable Oils and Blends. CRC Press. 209-244 pp. <https://doi.org/10.1201/9781439808634-c7>
- Turkmen, S., M.J. Zamorano, H. Xu, H. Fernández-Palacios, L. Robaina, S. Kaushik y M. Izquierdo. 2020. Parental LC-PUFA biosynthesis capacity and nutritional intervention with alpha-linolenic acid affect performance of *Sparus aurata* progeny. *Journal of Experimental Biology* 223(23). <https://doi.org/10.1242/jeb.214999>
- Vassallo-Agius, R., K. Mushiake, H. Imaizumi, T. Yamazaki y T. Watanabe. 1999. Spawning and quality of eggs of striped jack fed raw fish or dry pellets with 2% Spirulina. *Aquaculture Science* 47(3): 415-422. <https://doi.org/10.11233/aquaculturesci1953.47.415>
- Vassallo-Agius, R., T. Watanabe, H. Imaizumi y T. Yamazaki. 2002. Spawning performance of yellowtail *Seriola quinqueradiata* fed dry pellets containing paprika and squid meal. *Fisheries Science* 68(1): 230-232. <https://doi.org/10.1046/j.1444-2906.2002.00414.x>
- Verakunpiriya, V., K. Mushiake, K. Kawano y T. Watanabe. 1997. Supplemental effect of astaxanthin in broodstock diets on the quality of yellowtail eggs. *Fisheries Science* 63(5): 816-823.



- <https://doi.org/10.2331/fishsci.63.816>
- Verakunpiriya, V., K. Watanabe, K. Mushiake, K. Kawano, T. Kobayashi, I. Hasegawa, V. Kiron, S. Satoh y T. Watanabe. 1997. Effect of krill meal supplementation in soft-dry pellets on spawning and quality of egg of yellowtail. *Fisheries Science* 63(3): 433-439. <https://doi.org/10.2331/fishsci.63.433>
- Verakunpiriya, V., T. Watanabe, K. Mushiake, V. Kiron, S. Satoh y T. Takeuchi. 1996. Effect of broodstock diets on the chemical components of milt and eggs produced by yellowtail. *Fisheries Science* 62(4): 610-619. <https://doi.org/10.2331/fishsci.62.610>
- Villasante, A., C. Ramírez, N. Catalán, R. Opazo, P. Dantagnan y J. Romero. 2019. Effect of dietary carbohydrate-to-protein ratio on gut microbiota in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Animals* 9(3): 89. <https://doi.org/10.3390/ani9030089>
- Volkoff, H. y S. London. 2018. Nutrition and reproduction in fish. *Encyclopedia of Reproduction* 9: 743-748. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.20624-9>
- Watanabe, T., T. Arakawa, C. Kitajima y S. Fujita. 1984. Effect of nutritional quality of broodstock diets on reproduction of red sea bream. *Nippon Suisan Gakkaishi* 50(3): 495-501. <https://doi.org/10.2331/suisan.50.495>
- Watanabe, T., A. Itoh, A. Murakami, Y. Tsukashima, C. Kitajima y S. Fujita. 1984. Effect of nutritional quality of diets given to broodstock on the verge of spawning on reproduction of red sea bream. *Nippon Suisan Gakkaishi* 50: 1023–1028. <https://doi.org/10.2331/suisan.50.1023>
- Watanabe, T., T. Koizumi, H. Suzuki, S. Satoh, T. Takeuchi, N. Yoshida, T. Kitada y Y. Tsukashima. 1985. Improvement of quality of red sea bream eggs by feeding broodstock on a diet containing cuttlefish meal or on raw krill shortly before spawning. *Nippon Suisan Gakkaishi* 51(9): 1511-1521. <https://doi.org/10.2331/suisan.51.1511>
- Watanabe, T., M.-J. Lee, J. Mizutani, T. Yamada, S. Satoh, T. Takeuchi, N. Yoshida, T. Kitada y T. Arakawa. 1991. Effective components in cuttlefish meal and raw krill for improvement of quality of red seabream *Pagrus major* eggs. *Nippon Suisan Gakkaishi* 57(4): 681-694. <https://doi.org/10.2331/suisan.57.681>
- Watanabe, T. y W. Miki. 1993. Astaxanthin: An effective dietary component for red seabream broodstock. *Fish Nutrition in Practice*: 27-36. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19931463190>
- Watanabe, T., R. Vassallo-Agius, K. Mushiake, K. Kawano, V. Kiron y S. Satoh. 1998. The first spawn-

- taking from striped jack broodstock fed soft-dry pellets. *Fisheries Science* 64(1): 39-43. <https://doi.org/10.2331/fishsci.64.39>
- Watanabe, T., V. Verakunpiriya, K. Mushiake, K. Kawano y I. Hasegawa. 1996. The first spawn-taking from broodstock yellowtail cultured with extruded dry pellets. *Fisheries Science* 62(3): 388-393. <https://doi.org/10.2331/fishsci.62.388>
- Webster, C.D. y C. Lim. 2001. *Nutrition and Fish Health*. CRC Press. 432 pp.
- Wright, P.A. y H.J. Fyhn. 2001. Ontogeny of nitrogen metabolism and excretion. *Fish Physiology* 20: 149-200. [https://doi.org/10.1016/S1546-5098\(01\)20006-5](https://doi.org/10.1016/S1546-5098(01)20006-5)
- Xu, H., S. Turkmen, S. Rimoldi, G. Terova, M.J. Zamorano, J.M. Afonso, S. Sarih, H. Fernández-Palacios y M. Izquierdo. 2019. Nutritional intervention through dietary vegetable proteins and lipids to gilthead sea bream (*Sparus aurata*) broodstock affects the offspring utilization of a low fishmeal/fish oil diet. *Aquaculture* 513: 734402. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734402>
- Yadav, M., A. Khati, R. Chauhan, P. Arya y A. Semwal. 2021. A review on feed additives used in fish diet. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology* 6(2): 184-190. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35228.62080>
- Zhang, J., Y. Hu, Q. Ai, P. Mao, Q. Tian, L. Zhong, T. Xiao y W. Chu. 2018. Effect of dietary taurine supplementation on growth performance, digestive enzyme activities and antioxidant status of juvenile black carp (*Mylopharyngodon piceus*) fed with low fish meal diet. *Aquaculture Research* 49: 3187–3195. <https://doi.org/10.1111/are.13783>
- Zakeri, M., P. Kochanian, J.G. Marammazi, V. Yavari, A. Savari y M. Haghi. 2011. Effects of dietary n-3 HUFA concentrations on spawning performance and fatty acids composition of broodstock, eggs and larvae in yellowfin sea bream, *Acanthopagrus latus*. *Aquaculture* 310(3): 388-394. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.11.009>
- Zakeri, M., J.G. Marammazi, P. Kochanian, A. Savari, V. Yavari y M. Haghi. 2009. Effects of protein and lipid concentrations in broodstock diets on growth, spawning performance and egg quality of yellowfin sea bream (*Acanthopagrus latus*). *Aquaculture* 295(1): 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.06.026>



Zupa, R., C. Rodríguez, C.C. Mylonas, H. Rosenfeld, I. Fakriadis, M. Papadaki, J.A. Pérez, C. Pousis, G. Basilone y A. Corriero. 2017. Comparative study of reproductive development in wild and captive-reared greater amberjack *Seriola dumerili* (Risso, 1810). PLoS One 12(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169645>.

Cita

Hernández-de Dios M.A., M.C. Maldonado-García, D. Maldonado-García y F. Encarnación-Ramírez. Influencia de los macronutrientes y aditivos funcionales en la reproducción de peces marinos. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (1): 117-138. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0008>

Sometido: 25 de junio de 2024

Aceptado: 20 de febrero de 2025

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editor asociado: Dr. Luis Daniel Espinosa Chaurand

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

**CIBNOR triploid oyster: Research and collaboration with
the oyster farming sector of Baja California Sur**

Ostión triploide CIBNOR: Investigación y vinculación con el sector ostrícola de Baja California Sur

**Pedro Cruz-Hernández^{1*}, Héctor Acosta-Salmón¹, Fernando Aranceta-Garza¹,
José Luis Ramírez-Arce¹, Ismael Sánchez-Brito¹ y Carolina Sánchez-Verdugo¹.**

Resumen

El Estado de Baja California Sur es uno de los principales productores de ostión en México con un promedio de producción anual en los últimos seis años de 2,100 toneladas. El Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) cuenta con una historia de casi dos décadas de estudios orientados al establecimiento de un pie de cría de ostión del Pacífico (*Crassostrea gigas*) de elevada variabilidad genética con el objetivo de adaptarlo a las condiciones tropicales de la región. El Laboratorio de Mejoramiento Genético en Acuicultura (MeGA), adscrito al Programa de Acuicultura del CIBNOR, produce semilla de ostión de alta calidad mediante el uso de la biotecnología de poliploidía, específicamente semilla triploide biológica (3n), resultante de la cruce de hembras diploides con machos tetraploides. Durante los últimos cuatro años se ha suministrado esta semilla triploide biológica de ostión certificada a más de 15 organizaciones del sector social ubicadas en Bahía Magdalena, Santo Domingo y Guerrero Negro, Baja California Sur. Estas organizaciones han sido beneficiadas con una producción acumulada de 24.19 millones de semillas. El cultivo de ostión en el estado es una actividad importante dado que representa un motor que genera alimento, empleo e ingreso en la región, fomentado el desarrollo en las localidades donde residen los productores, además de ser una alternativa económica en crecimiento a nivel estatal, promoviendo la reconversión productiva de una actividad pesquera sobrexplotada a la acuícola, en un sector joven de la población (19 a 30 años), incorporando poco a poco a las mujeres (20%), en actividades costeras tradicionalmente desarrolladas por los hombres. El ostión triploide (3n) generado en el CIBNOR en relación con el ostión diploide (2n) representa una buena alternativa de cultivo debido a su crecimiento y bajo impacto ecológico.

¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096 – México.

* Autor de correspondencia: E-mail: pcruz@cibnor.mx

Abstract

The State of Baja California Sur is one of the main oyster producers in Mexico with an average annual production in the last six years of 2,100 tons. The Northwest Biological Research Center (CIBNOR) has a history of almost two decades of studies aimed at establishing a Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) breeding stock with high genetic variability with the aim of adapting it to the tropical conditions of the region. The Aquaculture Genetic Improvement Laboratory (MeGA), produces high-quality oyster seed through the use of polyploidy biotechnology, specifically biological triploid seed (3n), resulting from the crossing of diploid females with tetraploid males. During the last four years, this certified biological triploid oyster seed has been supplied to more than 15 social sector organizations located in Bahía Magdalena, Santo Domingo and Guerrero Negro, Baja California Sur. These organizations have benefited from a cumulative production of 24.19 million seeds. Oyster cultivation in the state of Baja California Sur is an important activity since it represents an engine that generates food, employment, and income in the region, promoting development in the localities where producers reside, in addition to being a growing economic alternative at the state level, promoting the productive reconversion of an overexploited fishing activity to aquaculture, in a young sector of the population (in the range of 19 to 30 years old), gradually incorporating women (20%), in coastal activities traditionally carried out by men. The triploid oyster (3n) generated at CIBNOR represents a good cultivation alternative in relation to the diploid oyster (2n), due to its faster growth and lower ecological impact.



Baja California Sur, principal productor ostrícola de México

El Estado de Baja California Sur (BCS), se ha posicionado como uno de los principales productores de ostión en México. Este logro ha sido posible gracias al impulso de la actividad ostrícola que el Gobierno Estatal, los laboratorios de producción larvaria y la academia, han ejercido en el sector social acuícola pesquero de las comunidades situadas en la costa del Pacífico de BCS. Según el Plan Estatal de Desarrollo del Gobierno de BCS, en 2021, la producción acuícola de moluscos bivalvos se reportaba con un crecimiento significativo, en particular con el cultivo de ostión japonés (*Crassostrea gigas*), cuya producción se incrementó en 400% entre 2011 y 2018, con un pico de producción de 4,876 toneladas en 2017 y un promedio anual en los últimos seis años de 2,100 toneladas, por lo que se considera que se trata de una de las especies objetivo más prometedoras para el desarrollo acuícola estatal (CONAPESCA, 2023).

Actualmente, el universo de acuicultores con permiso de acuicultura de fomento en BCS comprende 130 Unidades de Producción Acuícola (UPA), las cuales se ubican geográficamente, en los municipios de Comondú (84.6%), Mulegé (10%) y La Paz (5.4%) (Portal de Transparencia, CONAPESCA) (Figura 1).

El mismo Plan Estatal de Desarrollo de BCS, menciona que en aras de una reconversión productiva (pesquera o agrícola a la acuícola), el cultivo de moluscos es la actividad que requiere de menor inversión y tecnificación; sin embargo se reconoce que es necesario establecer un ordenamiento de la actividad, nuevas unidades de producción (espacios geográficos) e incrementar la producción de semilla, ya que se requieren anualmente grandes cantidades de este insumo para cubrir la demanda que representa el esfuerzo acuícola actual de moluscos bivalvos en el estado.

Actualmente son tres los laboratorios comerciales que registran producción de semilla de ostión japonés en el estado de BCS: 1) Marimex del Pacífico es el principal productor del estado con el 78.3% de la producción (120 millones de semilla/juveniles en 2023); seguido por las empresas 2) Sol Azul (20%) y 3) Acuícola Marsel (3.3%). Además de estas tres empresas, el estado cuenta con dos laboratorios académicos que generan semilla para estudios científicos y para su eventual venta al sector social: La Unidad Pichilingue de la UABCS (842,087 semillas equivalente al 0.5% de la producción del estado en 2023) y el Laboratorio de Mejoramiento Genético en Acuicultura del CIBNOR (5,415,000 semillas equivalentes al 3.3% de la producción estatal en 2023) (Portal de Transparencia, CONAPESCA).



Figura 1. Granja ostrícola en el estero de Santo Domingo, municipio de Comondú, BCS.

Bajo un contexto regional, BCS fue el segundo productor por volumen de ostión del Pacífico en el noroeste de México (2252 t) solo por detrás del estado de Baja California (2326 t) (Figura 2); sin embargo, la producción ostrícola del estado de BCS alcanzó el valor más alto (\$84 ' 225,000 pesos mexicanos, MXN) (CONAPESCA, 2023).

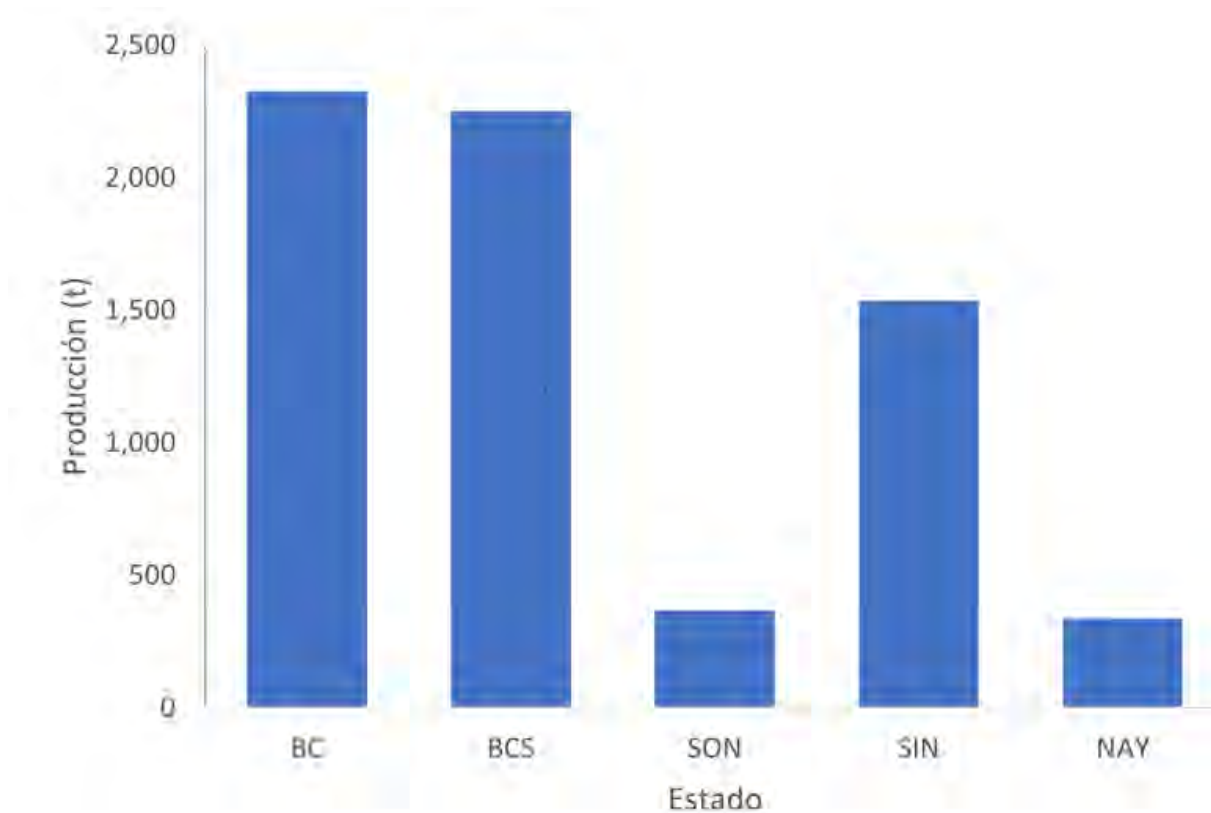


Figura 2. Producción (t) de ostión durante el 2023 para los estados de Baja California (BC), Baja California Sur (BCS), Sonora (SON), Sinaloa (SIN) y Nayarit (NAY). Datos de CONAPESCA (2023).

Sin embargo, es importante mencionar que la producción total de ostión en México disminuyó un 80% en 2021 (Figura 3) (CONAPESCA, 2023), y que en los dos últimos años se ha recuperado.

Tales fluctuaciones en la producción se han debido a problemas sanitarios y a un desabasto generalizado de semilla adaptada a las condiciones cálida-templadas en el Noroeste, relacionado con el cese o disminución de la producción en laboratorios, como el Centro Reprodutor de Especies Marinas del Estado de Sonora (CREMES) del Instituto de Acuacultura del Estado de Sonora (IAES), Litoral de Baja California del estado de Baja California y Sea Farmers en el estado de Sinaloa. Esto se debe en parte a la ausencia de estudios encaminados a la generación de pies de crías adaptados a la región y la nula implementación de biotecnologías para el mejoramiento genético; cuestión que no fue desatendida en Baja California Sur, como será abordado a continuación.

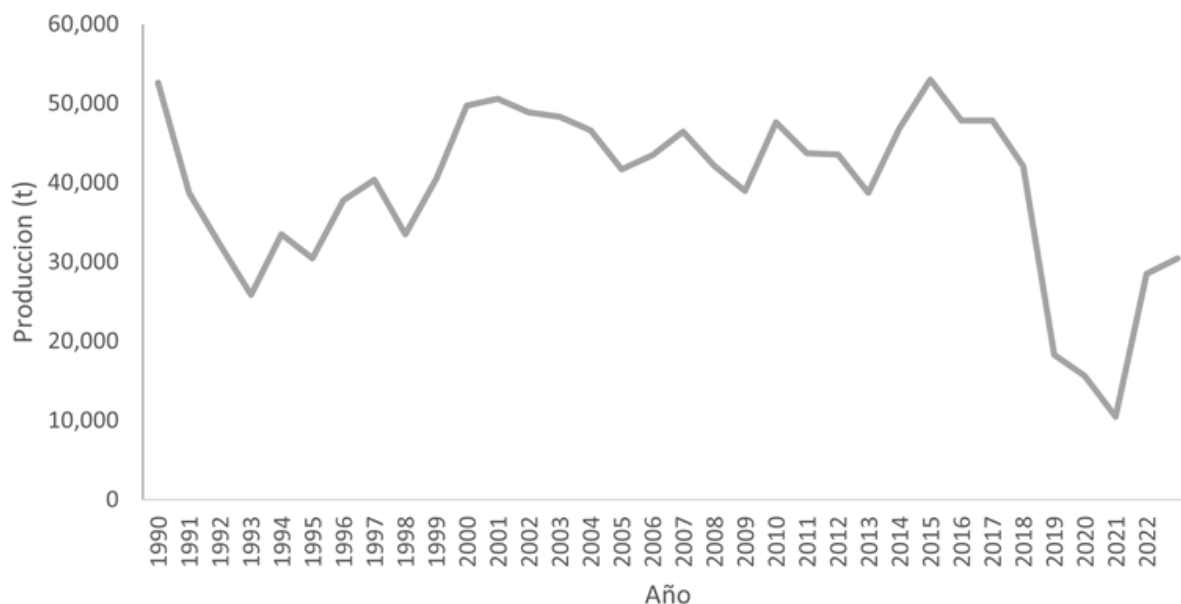


Figura 3. Histórico de la producción de ostión en México (1990-2023). Datos de CONAPESCA (2023).

Investigación aplicada para el mejoramiento genético de ostión en el CIBNOR

En el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), centro público de investigación de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), se cuenta con una historia de casi dos décadas de arduo trabajo coordinado por la Dra. Ana María Ibarra-Humphries, que inició con los estudios orientados al establecimiento de un pie de cría de ostión japonés (*Crassostrea gigas*) de elevada variabilidad genética, con el objetivo de adaptar a la especie proveniente de aguas templadas a las condiciones tropicales de la región. Tales investigaciones se hicieron en asociación con la empresa Sol Azul S.A. de C.V., a lo largo de diversos proyectos científicos, en donde se evaluó el cruzamiento entre diferentes líneas de ostión japonés, a través del establecimiento de sus diferencias genéticas a nivel molecular (Galindo-Sánchez, *et al.* 2008) y por su condición fisiológica, reproductiva (de las Heras, 2012) y desempeño productivo en engorda (2006-2007: Proyecto CONSORCIOS-CONACYT). Adicionalmente se aplicaron alternativas biotecnológicas para el cultivo del ostión (2008-2011: Continuidad Proyecto CONSORCIOS-CONACYT); se evaluó la reconversión productiva y transferencia de tecnologías para las comunidades ribereñas del Noroeste de México, a través del cultivo de ostión mejorado (2013: FORDECYT); se abordó el mejoramiento genético del ostión desarrollando un programa de selección (Ascencio-Michel, 2015) y aplicando biotecnologías de ploidía (2012-2015: Proyecto FINNOVA), para finalmente generar un programa de mejoramiento genético bipartita a través de asistencia científica y técnica (2017-2018: Contrato Sol Azul, S.A. de C.V. y CIBNOR). La investigación culminó con un



Programa de Mejoramiento Genético basado en el seguimiento de pedigríes, paquete tecnológico que fue transferido en el 2022 a la empresa Sol Azul, S.A. de C.V., a través de manuales que detallan la producción de semilla y manejo del ostión en sus diferentes etapas del desarrollo en el laboratorio y campo.

Actualmente el CIBNOR, cuenta con la biotecnología de mejoramiento genético a través de la poliploidización, técnica que entrecruza organismos con ploidías o juegos de pares cromosómicos diferentes creando organismos estériles (ver más adelante), y sustentada en dos manuales con derechos de autor (Ibarra-Humphries y Ramírez Arce 2021a; 2021b). Es importante señalar que la Dra. Ana María Ibarra-Humphries es pionera en México en la aplicación de la tecnología de poliploidización en recursos marinos, biotecnología que permite la producción de semillas de organismos triploides con un mejor desempeño, de ahí que gran parte de los laboratorios que producen semilla triploide de ostión en el Noroeste, por decir Acuicultura Robles, Marimex, y CREMES, han recibido la capacitación directa a partir de los manuales desarrollados por la Dra. Ana María Ibarra y el M.C. José Luis Ramírez.

Más recientemente, la investigación relacionada con el mejoramiento genético ha permitido generar herramientas moleculares que permiten la caracterización y selección de familias termotolerantes (Arredondo-Espinoza *et al.*, 2021; Juárez *et al.*, 2021; Arredondo-Espinoza *et al.*, 2023), así como marcadores moleculares para monitoreo de diversidad genética y endogamia (Pérez-Enríquez *et al.*, 2023).

Producción de semilla triploide biológica de ostión en el CIBNOR

En la actualidad, el Laboratorio de Mejoramiento Genético en Acuicultura (MeGA), adscrito al Programa de Acuicultura del CIBNOR, ha logrado producir semilla de ostión de elevada calidad mediante el uso de la biotecnología de poliploides, específicamente semilla triploide biológica ($3n$), resultante de la cruce de hembras diploides con machos tetraploides (Ibarra-Humphries y Ramírez-Arce, 2021b) (Figura 4).



Figura 4. Generación de semilla triploide en el Laboratorio de Mejoramiento Genético en Acuicultura (MeGA).



Es importante mencionar que la mayoría de los animales somos diploides ($2n$), es decir poseemos dos juegos de cromosomas que es donde reside el material de la herencia, propiamente los genes que están conformados por ADN, siendo un juego de cromosomas heredado por cada padre; por tanto, un organismo triploide ($3n$) será aquel que posea tres juegos de cromosomas, la cual es una condición anormal e inducida en el laboratorio (Figura 5).

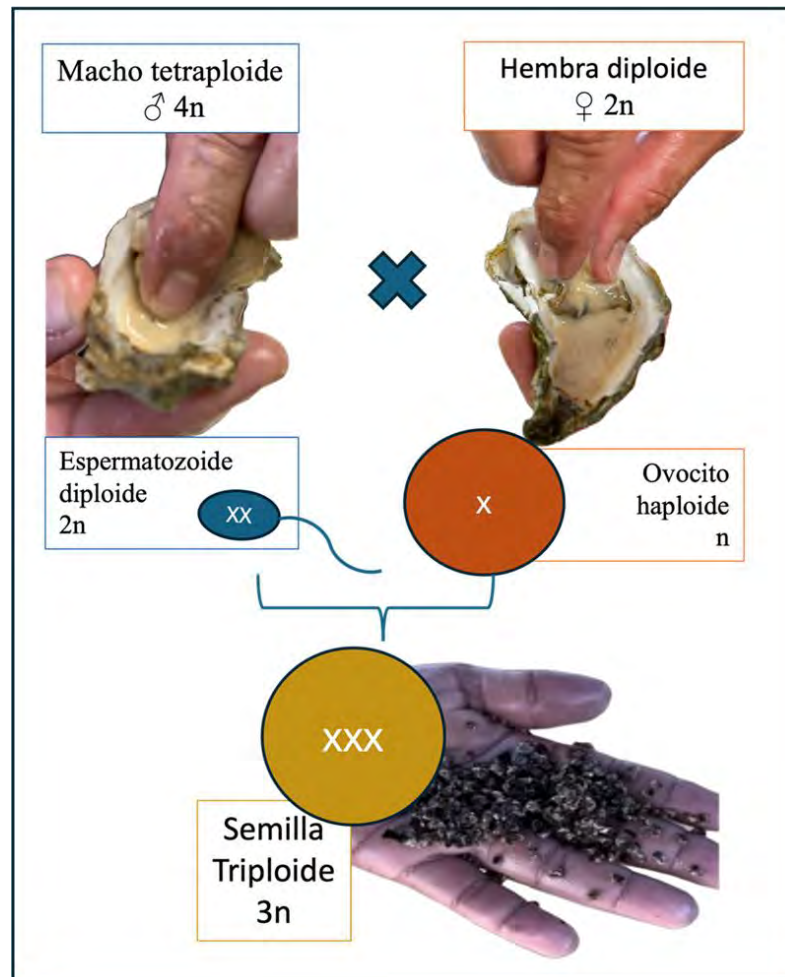


Figura 5. Esquema de producción de semilla triploide ($3n$) biológica en el CIBNOR, a partir de la cruce de macho tetraploide ($4n$) con hembra diploide ($2n$). Interpretación general del Manual de Ibarra-Humphries y Ramírez-Arce (2021b).

Es relevante mencionar que la triple carga de cromosomas en los organismos triploides ($3n$) los hace estériles, ya que no son capaces de madurar sus gametos, por lo que la energía destinada habitualmente en un diploide para madurar su gónada se canaliza hacia un mayor crecimiento (Ibarra et al., 2017). Por tanto, la esterilidad reduce el impacto ecológico de las especies exóticas, como es el caso de *C. gigas*, evitando la invasión y desplazamiento de las especies nativas de bivalvos.

Durante los últimos cuatro años se ha suministrado de semilla triploide biológica, certificada como 3n al 100% con la ayuda de un Analizador de ploidías, a más de 15 organizaciones del sector social ubicadas en Bahía Magdalena, Santo Domingo y Guerrero Negro, beneficiadas con una producción acumulada de 24.19 millones de semillas (Figura 6).

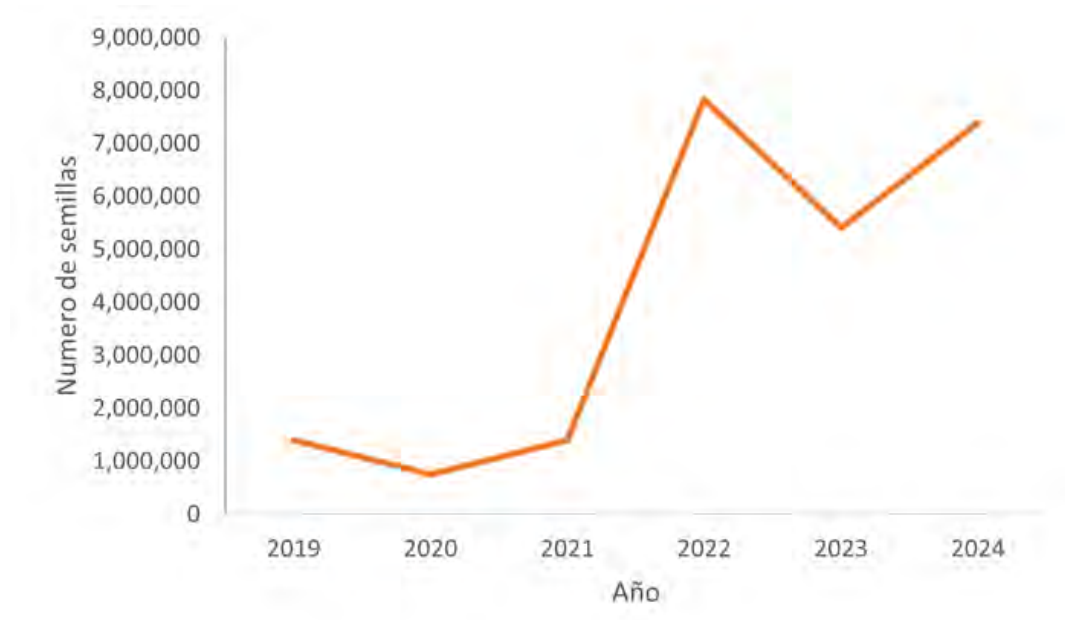


Figura 6. Producción de semilla 3n en el CIBNOR en el periodo 2019-2024.

Cabe mencionar que el Laboratorio no cerró sus actividades durante la pandemia por COVID-19, cuidando el aforo y las medidas de sana distancia, generándose así 750 mil semillas durante el 2020 y un millón 400 mil en el 2021, apoyando a siete grupos sociales. Es importante mencionar que la semilla es adquirida por un costo, estableciéndose una ventanilla de venta en el CIBNOR, en donde el precio para la semilla comercial de 2-5 mm se ha incrementado de 100 pesos MXN por millar (2019) a 175 pesos MXN por millar en el 2023, siendo actualmente de 160 pesos MXN por millar, para una semilla pre-comercial de 1.6 mm.

El Laboratorio MeGA cuenta con Certificado Sanitario vigente por parte del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), lo que ratifica su calidad, siendo el primer laboratorio académico en certificarse y sumarse a los laboratorios de producción del Estado de BCS, que se encuentran bajo regulación oficial para el cultivo de especies acuáticas, que no presentan eventos asociados con enfermedades.



Seguimiento al desempeño de la semilla de ostión triploide CIBNOR en la región

A partir del año de 2022, y una vez que se consolidó una lista de clientes habituales, se invitó a los pequeños productores a participar en el seguimiento formal al crecimiento y supervivencia del ostión triploide del CIBNOR en sus localidades con el arte de cultivo que manejan. Para lo cual se implementó una libreta de campo a manera de bitácora en donde se les solicitó registrar el lote de semilla, la fecha de siembra, la cantidad de semilla, el tipo de arte de cultivo que usan, y el desempeño del ostión triploide, que básicamente consiste en la medición de la altura de 30 organismos, con la ayuda de un vernier que les fue facilitado; esto se realizó cada vez que se hicieran ajustes de la densidad (deshoble). En mayo del año de 2022, cuando se realizó una visita al campo acuícola de uno de los grupos sociales en Santo Domingo (Figura 7), en donde de primera mano se les entregó la bitácora de campo y se les explicó cómo proceder, de aquí derivaron dos entrevistas que fueron producidas y promovidas por medios electrónicos por el Área de Divulgación del CIBNOR (Programa Tiempo de Ciencia 2022a; 2022b). Así mismo, ese mismo año se les entregó la bitácora de campo al resto de los pequeños productores al momento de recibir la semilla en las instalaciones del CIBNOR.



Figura 7. Visita a granja de cultivo en el estero de Santo Domingo para la entrega de semilla y bitácora de campo.

Para el ciclo 2022-2023 a partir del seguimiento de las bitácoras se pudo registrar el crecimiento del ostión triploide de nueve diferentes siembras realizadas por cuatro productores. De acuerdo con la Figura 8, se puede distinguir entre el periodo principal de producción de semilla y subsecuente siembra en campo de finales de abril a principios de julio, en donde se observa un mejor crecimiento de primavera a verano, con respecto a un segundo periodo de siembra en septiembre y crecimiento de otoño a invierno.

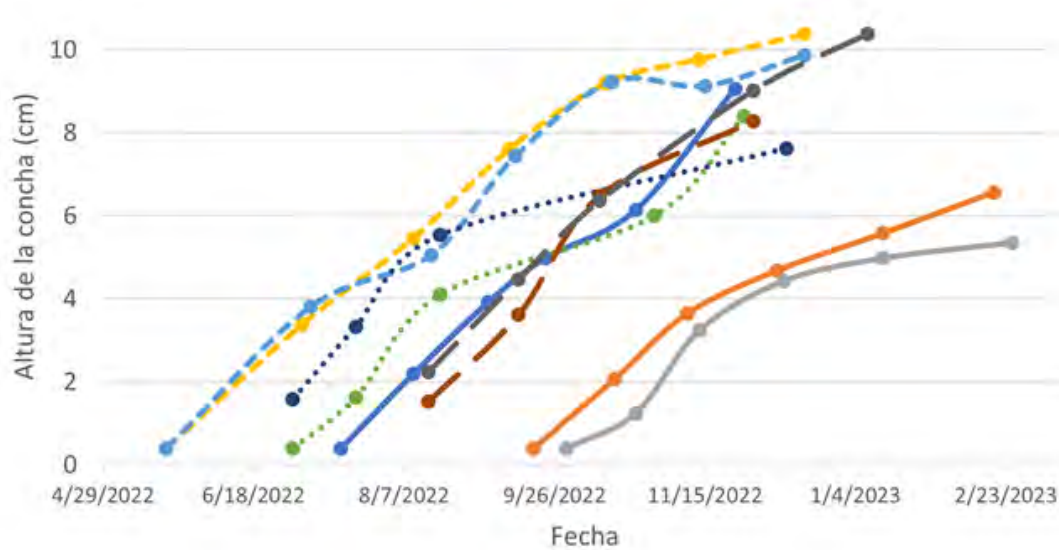


Figura 8. Crecimiento en altura de la concha de ostión triploide CIBNOR en el Estero de Santo Domingo, BCS. Cada línea representa uno de los nueve diferentes eventos de siembra de la semilla.

Actualmente, la investigación en campo del desempeño de la semilla triploide continúa, dando seguimiento a la productividad en las granjas de las organizaciones familiares, considerando la temporalidad y artes de cultivo empleadas, lo que permitirá concluir un estudio bioeconómico.

Acciones de extensionismo del CIBNOR con el sector social ostrícola

Como parte del acompañamiento al sector social en esta actividad productiva, se han promovido acciones de vinculación y seguimiento a la colaboración con los productores, a fin de fomentar acciones de control y seguimiento de las sociedades cooperativas que en el mejor de los casos son organizaciones familiares. Para lograr lo anterior, se elaboró un cuestionario que fue aplicado personalmente en campo a un grupo de siete unidades de producción. Con este instrumento se recabó información relacionada con las principales características de las unidades de producción acuícola, que en resumen ocupan en promedio 4 hectáreas de superficie efectiva del espejo de agua empleada en la producción, la siembra la realizan principalmente de los meses de abril a noviembre y la cosecha en los meses de noviembre a abril. Para la cosecha de ostión se requirió la siembra de



5'270,000 semillas de las cuales el 94% son triploides y 6% diploides. Las unidades de producción acuícola generan alrededor de 126 empleos directos siendo 21.43% mujeres y 78.57% hombres. De los 126 trabajadores, 77 son socios de las cooperativas siendo 81.81% hombres y 18.18% mujeres. Los precios de venta por pieza (con concha) de ostión fresco con una talla de cosecha de 6 a 8 cm se encuentran entre los 3.75 a 4.00 pesos MXN en el año 2023, también se venden piezas con medida de 9 a 11 cm y de 12 a 13 cm. Los ingresos brutos de la producción generados en el año 2023 se estimaron aproximadamente en 8'791,200 pesos MXN por la venta de 2'266,000 piezas de ostión con un precio promedio de venta de 3.87 pesos MXN por pieza. En general se tiene una merma por la tasa de mortalidad del recurso que se estimó en 42.99%, calculando una merma económica de alrededor de 7'609,800 pesos MXN con un precio promedio de 3.61 pesos MXN por pieza.

Respecto al cuestionario orientado a conocer indicadores socioeconómicos se realizó por medio de la plataforma "question pro" enviando el vínculo por medio de la aplicación de WhatsApp a los contactos de las unidades de producción durante el mes de septiembre del año 2023, de los cuales fue contestada por quince personas (n=15), donde el 73% son de la localidad de Santo Domingo, 20% de la localidad de María Auxiliadora y 7% de la Villa Ignacio Zaragoza. El 60% que respondió fueron hombres, 20% mujeres y 20% prefirió no identificar su género. El principal rango de edades se ubica entre 26 a 30 años y el rango de 19 a 25 años con el mismo porcentaje (27% cada uno). El 60% de los encuestados son menores de 36 años, teniendo un promedio de edad de 35.67 años, siendo en general una población joven (Figura 9).

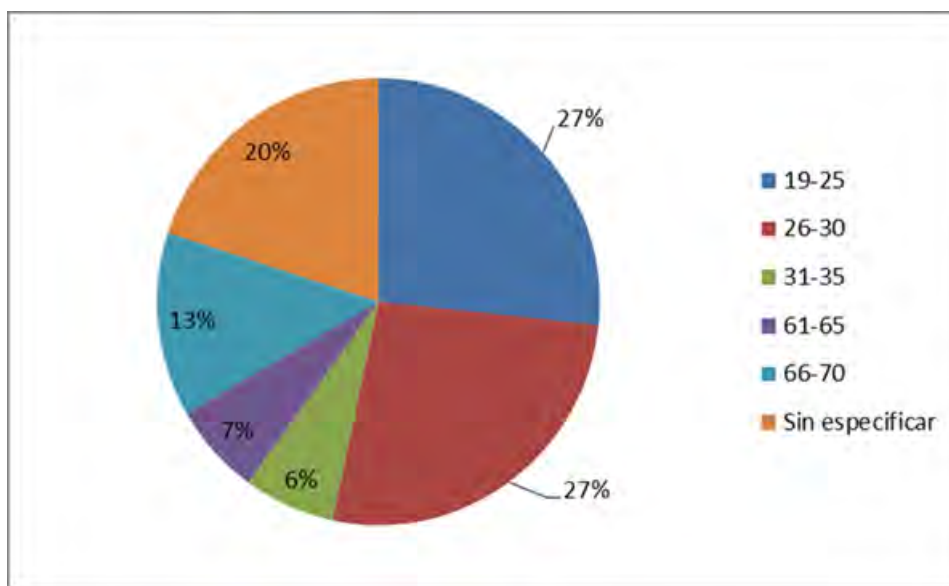


Figura 9. Porcentaje de rango de edades de los encuestados(n=15).

El promedio de residencia de los encuestados en la localidad es de 33.83 años lo que implica un arraigo importante en la comunidad siendo el 40% que ha residido entre 21 a 30 años en su misma localidad, entre el rango de 61 a 70 años residiendo en la misma localidad el 20%, el 13% ha residido entre 8 a 20 años, el 7% ha residido entre 31 a 40 años y el 20% no especificó.

La escolaridad promedio es de 10.8 años, teniendo el nivel de licenciatura, secundaria, primaria y sin datos el 20% cada uno respectivamente, seguido del nivel media superior con el 13% y el 7% con carrera técnica (Figura 10).

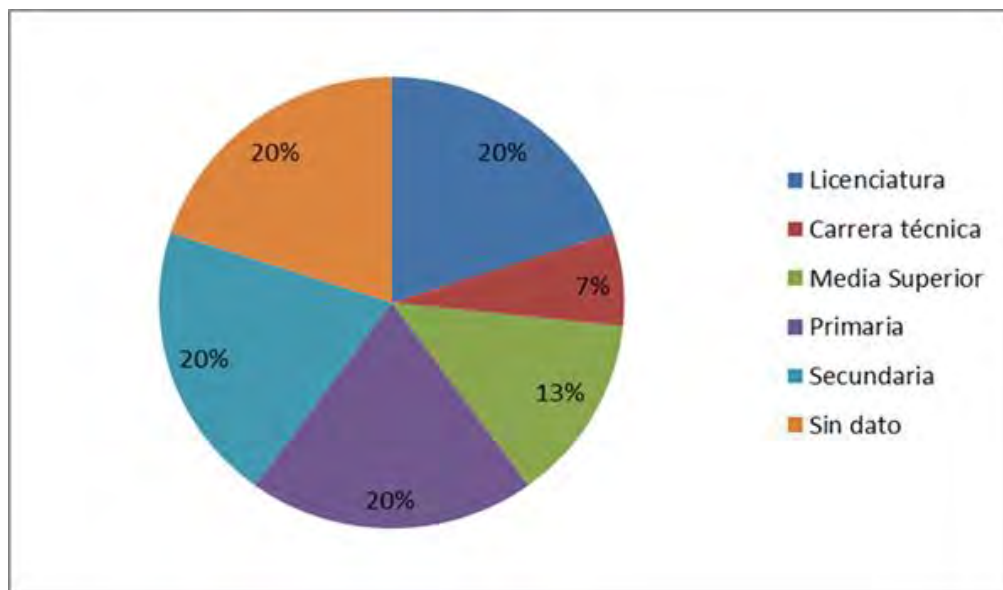


Figura 10. Porcentaje del nivel de escolaridad de los encuestados (n=15).

De los encuestados el 47% señalaron que son jefes de familia, el 20% mencionó que no lo es y el 33% no contestó. Los dependientes económicos en promedio son 2.6 personas por familia. En promedio tienen un ingreso familiar mensual de 7,444.44 pesos MXN.

En los temas laborales el 56% de los encuestados son cooperativistas y 44% trabajan con permisionarios. El ingreso promedio mensual por persona por la actividad acuícola es de 6,278 pesos MXN, laboran en promedio 11.33 meses al año, laborando 4.56 días a la semana en promedio y trabajando 6.89 horas en promedio al día. El 50% tienen otro trabajo aparte de la actividad acuícola, y de estos el 50% le significa entre el 51 al 70% de sus ingresos y el otro 50% le significa entre el 21 al 40% de sus ingresos. El 63% de los encuestados anteriormente se dedicaban a la actividad pesquera y el 37% se dedicaban a otras actividades.



Conclusión

La actividad acuícola, en específico la ostrícola, es importante dado que representa un motor para el desarrollo de la región ya que genera alimento, empleo e ingreso, además de ser una alternativa económica que a su vez se refleja el crecimiento en el sector acuícola a nivel estatal. La diversificación productiva es importante, derivado de una actividad pesquera sobreexplotada, para la población joven (19 a 30 años), así como la incorporación de las mujeres en la actividad acuícola (20%), en actividades costeras tradicionalmente desarrolladas por el hombre. El ostión triploide (3n) generado en el CIBNOR en relación con el ostión diploide (2n) representa una buena alternativa de cultivo debido a su crecimiento y bajo impacto ecológico. Así mismo, se hace relevante el realizar estudios comparativos del desempeño de 3n vs 2n en cada microregión, cuestión que está siendo actualmente atendida. Es importante mencionar la importancia del trabajo multidisciplinario y transdisciplinario, este último relativo con la participación de los diferentes actores sociales, académicos y gubernamentales.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo técnico en el laboratorio MeGA para la producción de semilla (Octavio Atilano García, Yenni Morales Cristóbal), así como para la producción de microalgas (Gabriel González Gómez, Julián Garzón Favela). La información generada del desempeño de la semilla de ostión triploide en la región y las acciones de extensionismo con el sector social ostrícola fueron apoyadas por el proyecto de recursos propios del CIBNOR 20454 “Valoración de la tecnología de producción de semilla de bivalvos en el sector social”. Se agradece la disposición de las UPA de BCS que se han involucrado en el proyecto hasta el 2023: Sociedad Cooperativa de Producción Pesquera (SCPP) Esteros de Santo Domingo; SCPP Campo Las Vacas; SCPP La Fridera, SCPP Estela Maris; Andrés Mompala Geraldo, Francisco Cornelio Lucero Perpuly; Morro Santo Domingo, SCPP El Chisguete, Asociación de Productores Acuícolas del Municipio de Comondú, B.C.S.; Grupo Lovemo; Esparza e hijos; Marine Edén. También a la M.C. Diana Cunningham Cosío, por el apoyo en el diseño de la encuesta socioeconómica en la plataforma “question pro” adscrita a la Subcoordinación de Emprendimiento e Incubación de Base Científica y Tecnológica (SUBINCUBA) de la Coordinación de Vinculación, Innovación y Transferencia de Conocimiento a la Sociedad (COVITECS).

Referencias

- Arredondo-Espinoza R, Ibarra AM, Roberts SB, Sicard-González, MT, and C. Escobedo-Fregoso. 2023 Transcriptome profile in heat resilient Pacific oyster *Crassostrea gigas* families under thermal challenge. *Comparative Biochemistry and Physiology Part D Genomics Proteomics* 47:101089.
- Arredondo-Espinoza R, Ibarra AM, Steven R, Sicard-González MT, C. Escobedo-Fregoso. 2021. Differentially methylated gene regions between resistant and susceptible heat-phenotype of the Pacific oyster *Crassostrea gigas*. *Aquaculture* 543:1–8.
- Ascencio Michel, R. 2015. Heredabilidad y correlaciones entre caracteres de crecimiento y supervivencia del ostión japonés *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793) en El Cardón, Baja California Sur, México. Maestría en Ciencias. CICIMAR-IPN.
- CONAPESCA, Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca 2023. Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca. 278 pp.
- De las Heras-Saldaña, S. 2012. Evaluación del desempeño reproductivo a través de la expresión de los genes Cg-Foxl2, OyVlg, og- TGF- β y vtg en diferentes cruza de *Crassostrea gigas* sometidas a diferentes temperaturas. Maestría en Ciencias. CIBNOR. 152 pp.
- Galindo-Sánchez, C. E., Ibarra, A.M., and P. Cruz. 2008. Genetic diversity among four different world-wide lines of Pacific oyster *Crassostrea gigas* by microsatellites. *Physiomas* 08. 1-4 Sept. Brest, Francia.
- Ibarra A.M., Ascencio-Michel R., Ramírez J.L., Manzano-Sarabia M., Rodríguez y C. Jaramillo. 2017. Performance of diploid and triploid *Crassostrea gigas* grown in tropical vs. temperate natural environmental conditions. *Journal of Shellfish Research* 36 (1), 119-139. ISSN: 0730-8000. USA.
- Ibarra-Humphries A.M. y J.L. Ramírez-Arce. 2021a. Manual práctico. Inducción a la triploidía con citocalacina-b en ostión japonés *Crassostrea gigas*. Programa de Acuicultura. CIBNOR. La Paz, B.C.S. México. Copyright © 2021, Todos los derechos reservados, CIBNOR SC
- Ibarra-Humphries A.M. y J.L. Ramírez-Arce. 2021b. Manual práctico. Inducción a la tetraploidía en ostión japonés *Crassostrea gigas*. Programa de Acuicultura. CIBNOR. La Paz, B.C.S. México. Copyright © 2021, Todos los derechos reservados, CIBNOR SC



- Juárez O., Escobedo-Fregoso C, Arredondo-Espinoza R, and A. Ibarra. 2021. Development of SNP markers for identification of thermo-resistant families of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* based on RNA-Seq. *Aquaculture* 539:736618.
- Pérez-Enríquez R, Escobedo-Fregoso C, Mendoza-Carrión G, Max A, and S. Ávila. 2023. Plataforma tecnológica de análisis genético para potenciar el desarrollo acuícola de Baja California Sur, México. *Ciencia, Tecnología e Innovación para el Desarrollo de México*. Indexada al LATINDEX. ISSN: 2007-1310.
- Plan Estatal de Desarrollo de Baja California Sur 2021-2027. Gobierno de B.C.S. 356 pp.
- Portal de Transparencia, CONAPESCA. <https://conapesca.gob.mx/wb/cona/transparencia>
- Tiempo de Ciencia. 2022a. Impacto social de la producción de semilla de ostión mejorada. CIBNOROFICIAL. <https://www.youtube.com/watch?v=08qhi3UZQXk>
- Tiempo de Ciencia. 2022b. El valor del conocimiento en campo. CIBNOROFICIAL. <https://www.youtube.com/watch?v=2fPF1xrPPk8>.

Cita

- Cruz-Hernández P., H. Acosta-Salmón, F. Aranceta-Garza, J.L. Ramírez-Arce, I. Sánchez-Brito, C. Sánchez-Verdugo. Ostión triploide CIBNOR: Investigación y vinculación con el sector ostrícola de Baja California Sur. *Recursos Naturales y Sociedad*, 2025. Vol. 11 (1): 140-156. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0009>

Sometido: 5 de noviembre de 2024

Aceptado: 24 de febrero de 2025

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editor asociado: Dr. Alfonso N. Maeda Martínez

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

Beer here, beer there, but where's the waste?

Cerveza por aquí, cerveza por allá, pero ¿y dónde queda el desecho?

Gabriela Aguilar Zárate^{1‡}, Irma E. Martínez Rodríguez^{1‡},
David U. Santos Ballardo^{1*}

Resumen

La cerveza artesanal, aunque representa menos del 1% de la producción nacional, es parte de un movimiento cultural y económico del país que ha mostrado un gran crecimiento en los últimos años. No obstante, esta industria genera un impacto ambiental importante durante las diferentes etapas de su proceso productivo, principalmente debido a la producción de residuos orgánicos como el grano gastado, residuos de mosto y lúpulo, así como la levadura residual; que, de no manejarse adecuadamente, se convierten en una carga ambiental importante. Interesantemente, este tipo de residuos poseen una composición química muy rica en compuestos de interés como proteínas, fibra, lípidos, antioxidantes, vitaminas, minerales, entre muchos otros, que les dan un gran potencial como materia orgánica de calidad para su reciclaje y reutilización. Por otro lado, la industria cervecera, especialmente la artesanal, está adoptando estrategias sostenibles como el uso de energías renovables, reciclaje de residuos y optimización del consumo de agua para disminuir sus impactos. Bajo este tenor, una de las estrategias clave, es el aprovechamiento de los subproductos orgánicos para el desarrollo de biorrefinerías y modelos de economía circular. Ambos, modelos de trabajo permiten transformar los residuos orgánicos tradicionalmente considerados como desperdicios, en productos de valor añadido, que pueden incluir desde alimento para ganado, biomateriales (como bioplásticos), bioenergía (biogás para cocina, biodiesel para motores, etc.), compuestos químicos de alto valor, entre otros. Estos enfoques no solo pueden reducir el impacto ambiental, sino que también pueden generar ingresos adicionales que les permita a los productores artesanales desarrollar estrategias de producción económicamente más viables y sustentables.

¹Laboratorio de Ecotoxicología y Bioprocesos, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) Unidad Mazatlán.

‡ Estos autores tuvieron el mismo nivel de participación

* Autor de correspondencia: E-mail: ulises.ballardo@ciad.mx

**Palabras clave**

Cervecería artesanal, residuos orgánicos, economía circular, biorrefinerías.

Abstract

Although the craft beer represents less than 1% of Mexico's national production, it is considered as a part of a cultural and economic movement in the country that has shown an intense growth in recent years. Nevertheless, this industry generates significant environmental impacts during its production process, also, generates organic waste such as spent grain, must and hop residues, and residual yeast; that if not managed properly are considered a significant environmental burden. Interestingly, this kind of wastes presents in its composition different compounds such as proteins, fibers, lipids, antioxidant compounds, vitamins, among others; these compounds have great potential for recycling and reuse. On the other hand, the beer industry (especially craft beer) is adopting sustainable strategies such as the use of renewable energy, waste recycling and water consumption optimization, to reduce its impact. Among these options, one of the key strategies is the use of organic by-products for biorefineries development and circular economy models. These approaches could allow the transformation of wastes into value-added products, which can include livestock feed, biomaterials (like bioplastics), bioenergy (biogas, biodiesel, among others), high-value chemical compounds, among others. These advances could help to reduce environmental impact and generate added value and profits for craft beer producers, enhancing the production process.

Keywords

Craft beer, organic residues, circular economy, biorefineries.

Antecedentes

La importancia de la cerveza en México y el mundo

La cerveza es una bebida alcohólica obtenida a partir de la fermentación de cereales, originalmente a partir de cebada malteada (es decir, germinada, secada y tostada); aunque, a lo largo de la historia, prácticamente cualquier grano ha servido como ingrediente, como el centeno, avena, trigo, mijo, sorgo, entre otros, para elaborar variedades de cerveza con diversos toques de originalidad (Rachwat *et al.* 2020).

En cuanto a su consumo, dentro de todas las bebidas alcohólicas disponibles en el mercado, la cerveza ocupa el sexto lugar a nivel mundial y el segundo en América Latina, además, su popularidad sigue en aumento, especialmente entre los denominados “Millennials” y la “Generación Z”, debido a que actualmente el mercado muestra una tendencia ascendente hacia la generación de nuevas formulaciones, variedades y ofertas de sabores (INEGI, 2023); por otro lado, de acuerdo con el reporte de Barthhaas (2024), en 2023, la producción mundial de cerveza fue de 1.88 millones de hectolitros, representando un valor en el mercado mundial de 674,000 millones de dólares (Deloitte, 2024).

Actualmente, de una lista de 125 países, México ocupa el primer lugar como país exportador, ya que solamente en el 2023 exportó aproximadamente 4 mil millones de litros de cerveza fuera de sus fronteras; y es el cuarto lugar como país productor (Arvizu, 2024). Lo anterior, se ve reflejado en el hecho de que la industria cervecera en México se ubica en el lugar 19 de las actividades económicas más importantes, ya que durante 2023 se alcanzaron ventas de casi 10 mil millones de litros; además, durante la última década (2013 a 2023) se alcanzó un incremento anual sostenido cercano al 4.9% (Deloitte, 2024; La buena cheve, 2022; Redacción El Economista, 2024).

Por otro lado, dentro del giro de la industria de las bebidas alcohólicas a nivel nacional, la industria cervecera representa un alto porcentaje la generación de empleos (49.3%); siendo la cerveza la bebida alcohólica que más genera ganancias, representando cerca del 65.0% del valor total de este tipo de productos (ver Figura 1), esto significa que casi la mitad de las personas económicamente activas que laboran en empresas dedicadas a la producción de bebidas alcohólicas, lo hacen en aquellas relacionadas con producción de cerveza; de estos datos, también se desprende que,



dentro de este mercado, de cada peso que se genera, 65 centavos corresponden al mercado de la cerveza (INEGI, 2021).

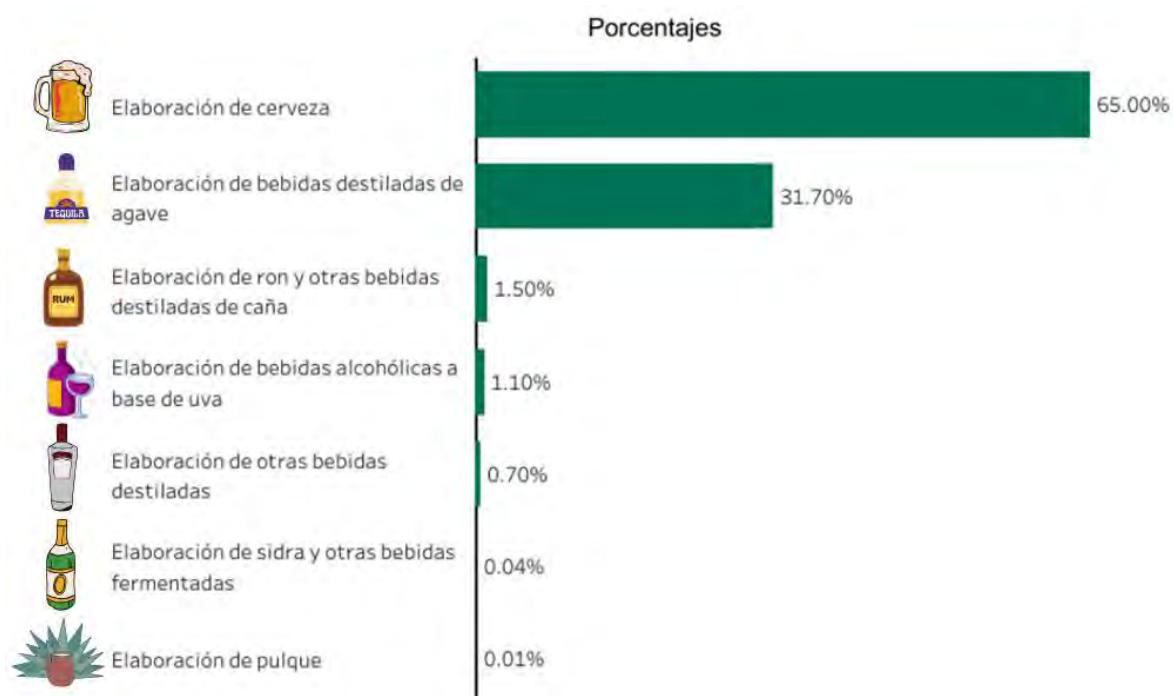


Figura 1. Importancia de la industria cervecera dentro del giro de las bebidas alcohólicas en México, con base en el porcentaje del valor total de los ingresos generados dentro del sector. Fuente: INEGI, 2021.

Pero entonces.... ¿Qué es la cerveza artesanal?

La cerveza artesanal, considerada como tal, tuvo su origen en los años 70 ´s en Reino Unido, donde fue utilizada para fomentar establecimientos a producir cerveza de manera tradicional a pequeña escala, y que sirvieran principalmente al mercado local o regional; debido a que producían cerveza en pequeñas cantidades fueron conocidas como “micro-cervecerías”; no obstante lo anterior, cabe aclarar que el término “artesanal” no fue concebido sobre la base de la poca cantidad de cerveza regularmente producida bajo este esquema, sino en una actitud y un enfoque alternativo que impulsara la experimentación con recetas e ingredientes novedosos y únicos, convirtiéndolas en una plataforma de innovación de un producto cada día más demandante, y así ofrecer una variedad de cervezas especializadas de alta calidad. Por otro lado, el tamaño del mercado de la cerveza artesanal durante 2024 se estima en 6,520 millones de litros y se espera que alcance más de 10 mil millones de litros para 2029 (Deloitte, 2024).

En particular la producción de cerveza artesanal en México poco a poco ha ganado terreno; y a pesar de que las cervecerías artesanales independientes producen actualmente en conjunto, menos del 1 % de toda la cerveza en México, se considera que su productividad va en aumento y forma parte de

un movimiento independiente que pretende rescatar y reinterpretar los estilos alrededor del mundo; de hecho, en 2023 su producción se incrementó en un 11% (con respecto a 2022) alcanzando un valor comercial de 125.6 millones de dólares (Deloitte, 2024; Nyhan *et al.* 2023).

Además, el número de fábricas de cerveza artesanal ya supera las mil doscientas a lo largo y ancho del país; por ejemplo, para el cierre de 2020 había 8730 empleados laborando en esta actividad económica; de los cuales, el 33% eran mujeres. Es importante comentar que la mayoría de la cerveza artesanal producida en México se destina al consumo nacional, y solamente el 7% se exporta al mercado internacional (De la Rosa, 2021).

Los estados con mayor producción han ido cambiando con el tiempo; en 2021, los principales productores fueron Baja California (considerada la cuna de la cerveza artesanal en México), Baja California Sur, Ciudad de México, Colima, Guanajuato, Jalisco y Nuevo León (IBU ´S, 2021). Para el 2022, Jalisco fue el estado con mayor producción, seguido de Nuevo León, Ciudad de México y Michoacán (La buena cheve, 2022); hoy en día, según Arvizu (2024) las entidades con mayor producción promedio son Jalisco, Guanajuato, Michoacán y Querétaro.

A pesar de que los productos de la cervecería artesanal suelen ser más caros en comparación con los derivados de la cervecería industrial, hay una tendencia de aumento en su consumo, lo que puede estar asociado a que su elaboración es muy cuidadosa y se basa en ingredientes prácticamente únicos y de alta calidad, también, este tipo de empresas han generado estrategias de distribución de mayor accesibilidad con puntos de venta en restaurantes, bares, y plataformas web, lo que contribuye a su gran aceptación sobre todo en un mercado cada día más exclusivo (Deloitte, 2024).

La cerveza artesanal es la onda, pero, ¿conoces el impacto ambiental de su producción?

El proceso de elaboración de la cerveza artesanal involucra de manera general diferentes etapas (ver Figura 2); inicia con la molienda y macerado de la malta, que después se combina con agua caliente para la extracción de los azúcares contenidos en ella; posteriormente, se obtiene el mosto que se separa de la malta residual que se denomina como “grano gastado” (GrG), primer subproducto del proceso. El mosto obtenido se transfiere a una olla de cocción donde se procede a hervir y se agrega lúpulo como conservador natural, además de que otorga el amargor, sabor y aroma específicos; posteriormente, se enfría y se transfiere a los fermentadores, el producto sedimentado en estos



equipos corresponde a los residuos de mosto y lúpulo (RML), segundo subproducto del proceso. Una vez iniciada la fermentación, los azúcares presentes en la mezcla son aprovechados por las levaduras añadidas, transformándolos en alcohol y dióxido de carbono; a partir del quinto o sexto día de fermentación, se hacen purgas para retirar los excedentes del último residuo del proceso, que es una mezcla de residuos de lúpulo y levadura (LR). Terminada la fermentación, cuando el producto ha conseguido el grado alcohólico deseado, pero aún permanecen residuos de levaduras en suspensión, que contribuyen al sabor áspero típico de la cerveza recién fermentada (llamada también “cerveza verde”); se realiza un proceso de maduración donde la cerveza reposa para clarificarse mediante un proceso de separación y precipitación de aglomeraciones residuales (de la malta y el lúpulo), obteniendo una mejora de las propiedades organolépticas, es decir, sabor, aroma, textura, etc. Una vez acabado el proceso de maduración, y antes de ser envasada, la cerveza puede filtrarse parcial o totalmente para eliminar materia remanente en suspensión, para finalmente ser envasada y distribuida (Mainardis et al. 2024).



Figura 2. Esquema de producción de cerveza artesanal. Las flechas verdes indican entrada de insumos; las flechas rojas, indican la generación de residuos. Fuente: Diseñada a partir de Mainardis et al. 2024.

La producción de cerveza tiene un impacto en el medio ambiente desde varios puntos de vista. En principio, durante el cultivo de la cebada y el lúpulo se utilizan grandes cantidades de agua, energía y fertilizantes, lo que coadyuva a la erosión gradual del suelo, utilizando además agua dulce de consumo humano en cultivos que no serán destinados a la atención de la demanda alimentaria. Durante el proceso de producción, el impacto ambiental varía según las prácticas específicas de cada cervecería y de las tecnologías que se utilicen. En la fermentación, embotellado y distribución, se requieren grandes cantidades de energía, que generan gases de efecto invernadero, contribuyendo al cambio climático; y se generan numerosos residuos cuya disposición final son vertederos al aire libre que causan contaminación en el suelo, agua y aire (Mezcal y Agaves, 2023).

En el proceso de elaboración se generan una gran cantidad de subproductos, dentro de estos podemos encontrar: aguas residuales, envases de un solo uso y no reciclables, además de residuos

sólidos que contienen subproductos orgánicos, destacando materiales como: residuos de mosto y lúpulo (RML); bagazo de malta conocido como grano gastado (GrG); levadura residual (LR), entre otros; todos estos representan materia orgánica que debe ser manejada adecuadamente para evitar impactos ambientales negativos (Nyhan *et al.* 2023).

De todos los residuos orgánicos generados, el GrG es el más abundante, representando cerca del 85%, lo que significa que se generan aproximadamente 15 Kg por cada 100 litros de cerveza producida; seguido de la LR que comprende entre 10 y 15 %; y en menor medida se generan los RML, con porcentajes entre 0.2 y 0.4 % (Olivares-Galván *et al.* 2022).

Es importante comentar que los residuos orgánicos (GrG, RML y LR) generados presentan una interesante ventaja, y es que en su composición química aún mantienen muchos compuestos que tienen potenciales usos comerciales (ver Figura 3), es decir, se les puede dar un valor agregado, por lo que se hace muy importante desarrollar estrategias para su gestión eficiente y reutilización (Rachwał *et al.* 2020).



Figura 3. Composición química de los principales residuos orgánicos generados en la producción de cerveza artesanal.

Fuente: Elaborado a partir de Olivares-Galván *et al.* 2022.

Prácticas Sostenibles en la Industria de la Cerveza Artesanal

Afortunadamente, esta creciente industria ha ido adoptando medidas para minimizar su impacto en el medio ambiente, realizando prácticas más ecológicas en todas las etapas de producción, desde el cultivo de ingredientes hasta el empaque y la distribución. Los cerveceros artesanales prefieren las materias primas locales como la cebada y el trigo procedente de los campos nacionales, que a



la vez reduce los costos para el productor (The Food Tech, 2024, Hejna *et al.* 2024, Mezcal y Agaves, 2023).

Dentro de las medidas implementadas para reducir la huella ecológica en las plantas procesadoras, se encuentra la innovación en la fermentación controlada, lo que ha permitido optimizar el consumo energético, haciendo más eficiente el proceso de producción y la utilización eficiente del agua; ya sea en la implementación de tecnologías avanzadas para el tratamiento del agua y su reutilización para minimizar el consumo y el desperdicio. Además, cada vez con mayor frecuencia se han ido reemplazando las fuentes energéticas tradicionales, por aquellas de fuentes renovables, como la solar y la eólica, para reducir las emisiones de carbono y la implementación de programas de reciclaje y reutilización de residuos (Mezcal y Agaves, 2023).

Entonces...los residuos orgánicos de cervecerías artesanales ¿Tienen valor?

Una gestión adecuada de los tres principales subproductos de la industria (GrG, RML y LR), puede reportar beneficios económicos y ayudar a proteger el medio ambiente de la contaminación causada por su acumulación excesiva. La eliminación de estos residuos usualmente es engorrosa para los productores, sin embargo, debido a sus características químicas son aptos para su reutilización para diferentes fines (Rachwat *et al.* 2020)

Grano gastado (GrG)

Se ha reportado que este subproducto tiene un contenido de sólidos volátiles (SV) superior al 95%, dicho parámetro se relaciona con un alto contenido de materia orgánica aprovechable; además, tiene un porcentaje limitado de cenizas (en general por debajo del 5%), lo que es bueno ya que estas se componen de minerales no aprovechables durante su transformación. Posee también un alto contenido de carbono (C) y nitrógeno (N), con rangos de 45-50% y del 2.4-4.4%, respectivamente, y también presenta un poder calorífico superior a 17 MegaJoules por kilogramo (MJ/Kg) (Rachwat *et al.* 2020).

Por otro lado, el GRG es un compuesto rico en fibras, generalmente constituido por 10%-15% de lignina, 15%-25% de celulosa y 20%-30% de hemicelulosa. En cuanto a las macromoléculas, un estudio reportó que contiene 32-60% de carbohidratos, 15-32% de proteínas totales y 6-10 % de grasas totales (Olivares-Galván *et al.* 2022).

Estas características fisicoquímicas del GrG, sugieren un enorme potencial para utilizarse como fuente de enriquecimiento y mejoramiento del perfil nutricional de alimentos tanto para animales

como humanos, como base de medios de cultivo para microorganismos, para la producción de enzimas, biofertilizantes o mejoradores de suelo, además de poder usarse como materia prima para la obtención de energéticos renovables como biogás y/o bioetanol (Hejna *et al.* 2024).

En particular, el aprovechamiento de GrG mediante digestión anaeróbica puede por sí solo generar suficiente biometano para suplir una fracción de la energía requerida para los procesos de pequeñas cervecerías. Por ejemplo, Sganzerla *et al.* (2021; 2023), realizaron la co-digestión anaeróbica de GrG con agua residual de la planta tratadora de agua de una cervecería en Brasil, obteniendo bioenergía en forma de biogás capaz de generar electricidad (0.348 kWh/kg de sólido volátil) y calor (1556 MJ/kg de sólido volátil), reduciendo el impacto ambiental y promoviendo la economía circular.

Residuos de mosto y lúpulo (RML)

La composición de los RML puede variar según el proceso de elaboración de la cerveza, pero comúnmente este subproducto puede contener carbohidratos, fibras, azúcares fermentables, residuos de lúpulo y aceites esenciales que no son extraídos durante su ebullición debido a su limitada solubilidad en agua (Hejna *et al.* 2024).

Dada su composición tienen potencial para ser un material barato para la extracción de compuestos valiosos para la industria alimentaria y un componente de los medios utilizados en procesos biotecnológicos para la producción de compuestos de alto valor, así como enzimas para la industria alimentaria, la producción de biogás, e incluso para la generación de biomateriales de construcción ecológicos (Rachwał *et al.* 2020).

Un ejemplo de lo anterior es una startup llamada “HopfON”, creada en Baviera, Alemania, la cual aprovecha los desechos de RML generados por la industria cervecera para desarrollar productos sostenibles que reducen el impacto ambiental de la construcción. Los residuos de lúpulo se secan y se cortan en láminas, después se utilizan agentes aglutinantes para convertir la biomasa en productos tipo “blocks” para la construcción, con características interesantes como aislante térmico y de sonido. A través de la colaboración con investigadores y agricultores, HopfON busca cerrar el ciclo de producción y fomentar un futuro más responsable en la gestión de recursos (Dazio, 2024).



Levadura residual (LR)

Este residuo resulta de una proliferación intensiva de la levadura durante la fermentación del mosto, usualmente se elimina durante diversas etapas del proceso y al final de este. La cantidad de LR que se genera depende de varios factores como el tipo de levadura, la floculación y el comportamiento de sedimentación, y su presencia puede alcanzar hasta un 15 % del total de los subproductos generados en el proceso (Rachwat *et al.* 2020).

La LR está compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos no celulósicos y de vitaminas; además, presenta un alto contenido en péptidos que les confieren actividades bioactivas, que una vez que se han inactivado y secado pueden utilizarse también como fuente de nitrógeno. Debido a su alto contenido proteico (15-78% en base seca), este residuo comúnmente se utiliza como fuente de proteína para alimentación animal (donde no alcanza un valor alto de mercado); sin embargo, gracias a su contenido de aminoácidos esenciales, realizando un proceso ligero de purificación, este subproducto tiene potencial como fuente de nutrientes para el crecimiento de microorganismos, una industria donde se alcanzan mayores utilidades o ganancias a partir del mismo material (Hejna *et al.* 2024).

Por otro lado, a pesar de su poca aplicación como sustrato de digestión anaerobia, la LR ha demostrado que tienen un potencial metanogénico interesante, que puede alcanzar hasta 480 mililitros de metano por gramo de sólido volátil (mL CH₄/g SV), dándole un importante potencial para su empleo como biogás (Olivares-Galvan *et al.* 2022).

Un ejemplo del aprovechamiento industrial de la LR ocurre en la empresa alemana “Saccha”, llamada así en honor a la levadura (*Saccharomyces*) que utilizan para elaborar la cerveza, este grupo de trabajo procesa la LR para recuperar un producto en polvo con contenidos aproximados de 80 % de proteína y 20 % de texturas fibrosas, con un sabor agradable para el público en general, obteniendo una fuente de proteína catalogada como “vegana” y con un nivel de aceptabilidad adecuado (Southey, 2021).

Utilización de los residuos orgánicos bajo política de “cero residuos”

Actualmente los residuos generados durante la elaboración de cerveza están siendo subutilizados, ya que los principales subproductos (GrG, RML y LR) usualmente se utilizan bajo el enfoque conocido como “reciclaje convencional”, donde se emplean para generar un solo producto, que además, usualmente de bajo valor comercial; esta estrategia, a pesar de que es potencialmente rentable, se considera poco eficiente en cuestión total de procesos, debido a la interrupción de los ciclos y a que no se logra utilizar todo el material disponible (Hejna *et al.* 2024).

Desde el punto de vista de las cervecerías artesanales, el desarrollo de métodos de aprovechamiento de residuos más eficientes debe estar motivado no solo por el cuidado del medio ambiente, sino también por aspectos económicos, ya que el aumento del valor de los subproductos puede impulsar la rentabilidad de los establecimientos, haciéndolos incluso más atractivos. Recientemente, se ha destacado una proactividad ambiental en las cervecerías artesanales, gracias a la implementación de estrategias para gestionar los procesos de manera más consciente mediante el desarrollo de biorrefinerías (ver Figura 4), que son procesos donde se busca el aprovechamiento integral de la biomasa residual disponible tratando de alcanzar procesos de “cero residuos” (Olivares-Galvan *et al.* 2022).

Un ejemplo de esto, es el equipo multidisciplinario denominado Carrillo Biorefinery Lab que ha promovido la cooperación entre el Tecnológico de Monterrey, el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), y el Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) del Departamento de Energía de los EE.UU., para desarrollar un proyecto para transformar el GrG en bioetanol como producto principal, para su aplicación como biocombustible, así como otros productos alternos que se derivan del proceso, tales como fitohormonas (promotores de crecimiento vegetal) y moléculas con alto valor nutricional y comercial (enzimas, proteínas, antioxidantes, entre otras). La meta es desarrollar un modelo de economía circular adaptable para diversas cervecerías, permitiéndoles no solo valorizar sus residuos mediante procesos de transformación directa, sino además fomentar el desarrollo de nuevos emprendimientos que aprovechen los residuos cerveceros como materia prima de biorrefinerías (Carrillo-Nieves & Saldarriaga-Hernández, 2024).

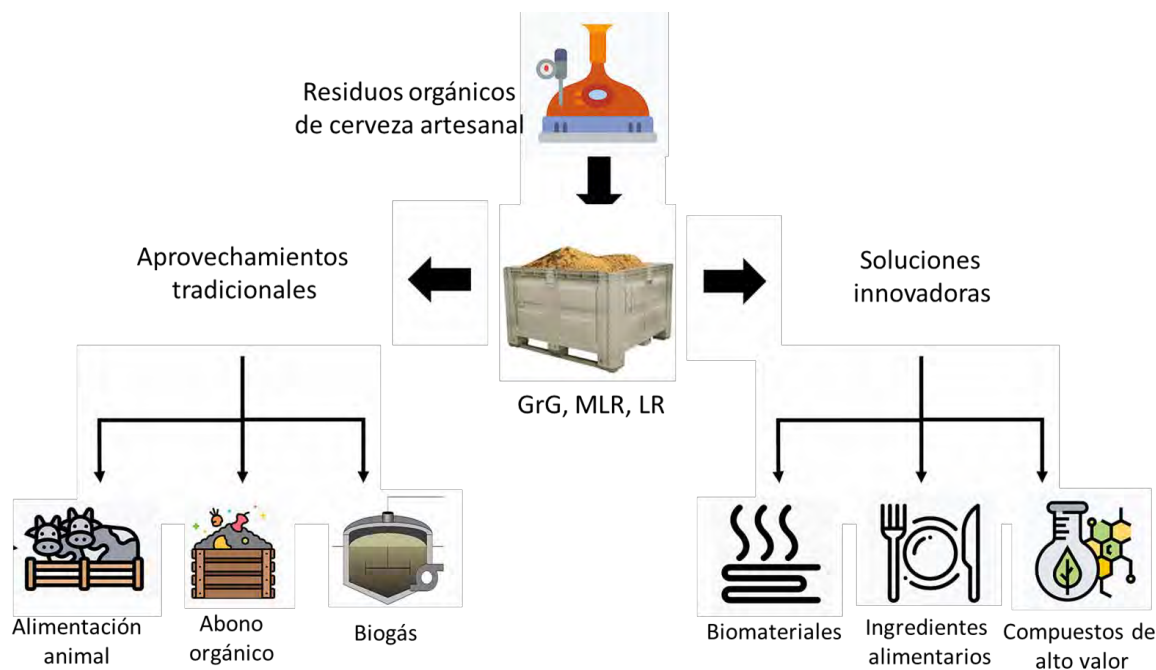


Figura 4. Esquema de los enfoques de aprovechamientos para los residuos orgánicos generados en la producción de cerveza artesanal.

Perspectivas y consideraciones

En conclusión, la producción de cerveza, per se, tiene un impacto significativo en el medio ambiente, por esta razón es importante que se adopten prácticas sostenibles y se busquen alternativas más ecológicas para reducir su huella ambiental. Para abordar estos problemas, muchas empresas cerveceras han adoptado estrategias comunes que incluyen la reutilización y reciclaje de aguas residuales, la optimización del consumo de energía, la adopción de envases reutilizables o reciclables y la gestión eficiente de residuos sólidos.

En la actualidad, el desarrollo de tecnologías que promuevan la economía circular, y que al mismo tiempo disminuyan la carga orgánica de los residuos generados en la elaboración de cervezas artesanales, es vital para la alcanzar la sustentabilidad de este tipo de industrias; por ende, la implementación de propuestas alternativas no solo puede ayudar a reducir el impacto ambiental, sino que también puede generar ingresos adicionales para las cervecerías haciéndolas más rentables. En resumen, aunque la industria cervecera ha ido dando pasos importantes hacia la sustentabilidad, las cervecerías artesanales son los ejemplos más inspiradores hacia el logro de este fin... ¡Salud!

Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. Miguel Betancourt Lozano, Dra. Karla Denisse Luna Avelar y a la Ing. Berenice Elizabeth Lizarraga Lizarraga, miembros del grupo de trabajo de Ecotoxicología y Bioprocesos de CIAD con quienes se participa en un proyecto de investigación sobre aprovechamiento de residuos cerveceros que inspiró el presente trabajo.

Agradecemos enormemente la contribución proporcionada por el Ing. Juan Vega Peralta, Rosa María Valenzuela, Ing. Rodolfo Barraza, Alfredo Barreras Torres e Irma Soto del CIBNOR Hermosillo.

Referencias

- Arvizu, D. (2024, 31 octubre). México lidera exportación mundial de cerveza y crece su industria artesanal. México Lidera Exportación Mundial de Cerveza y Crece Su Industria Artesanal. Noticias de México. <https://www.elimparcial.com/dinero/2024/10/31/mexico-lidera-exportacion-mundial-de-cerveza-y-crece-su-industria-artesanal/>
- Barthhaas. (2024). BarthHaas Report 2023/2024. Disponible en <https://www.barthhaas.com/resources/barthhaas-report#!download>. Acceso 15 Noviembre 2024.
- Carrillo-Nieves, D., Saldarriaga-Hernández, S.C. (2024). Bagazo cervecero: desecho que se transforma en etanol y pizza. Disponible en: <https://tecscience.tec.mx/es/divulgacion-ciencia/bagazo-cervecero/>. Acceso 20 Noviembre de 2024.
- Dazio, S. (2024). This german startup uses hops to reduce wastes from beer and construction. Associated Press. Disponible en <https://www.fastcompany.com/91200720/hops-german-startup-reduce-waste-beer-construction>. Acceso 19 de Noviembre 2024.
- De la Rosa, E. (07 de 04 de 2021). Pese a covid, producción de cerveza artesanal creció más que industrial en 2020: Acermex. Obtenido de Milenio: <https://www.milenio.com/negocios/produccion-cerveza-artesanal-crecio-industrial-2020>
- Deloitte, S.C. (2024). La cerveza artesanal una experiencia multisensorial. 2da Edición. Disponible: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/mx/Documents/consumer-business/2024/Cerveza-artesanal-segunda-edicion.pdf>. Último acceso: 15 de Noviembre de 2024.



- Hejna, A., Barczewski, M., Kosmela, P., Anisko, J., Szulc, J., Skórczewska, K. (2024). More than just a beer-Brewers ´s spent grain, spent hops, and spent yeast as potential funtional fillers for polymer composites. *Waste Management*, 23-35. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.03.023>
- IBU ´S. (27 de Abril de 2021). Crece el número de Cervecerías Artesanales. Obtenido de Colibri, Arte y Publicidad: <https://ibus.mx/crece-numero-de-cervecerias-artesanales-en-mexico-en-2021/#:~:text=Los%20estados%20que%20producen%20mayor%20volumen%20de%20cerveza,Colima.%205%20Guanajuato.%206%20Jalisco.%207%20Nuevo%20Le%C3%B3n>
- INEGI. (2021). Conociendo la Industria de la Cerveza. Colección de estudios sectoriales y regionales, 45. Obtenido de INEGI. Disponible en https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198428.pdf. Ultimo acceso 15 de Noviembre de 2024.
- INEGI. (2023). Censos Económicos. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI),: <https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/547#:~:text=Los%20Censos%20Econ%C3%B3micos%202019%20son%20un%20proyecto%20de,gran%20nivel%20de%20detalle%20geogr%C3%A1fico%2C%20sectorial%20y%20tem%C3%A1tico%22>. Acceso: 24 de Abril de 2024.
- La buena Cheve. (2022). Los Cuatro Principales Estados Productores Concentraron 56.2% de la Producción Nacional. Obtenido de La Buena Cheve: <https://labuenacheve.com/blog/los-10-estados-que-mas-producen-cerveza-en-mexico/>. Acceso 20 Noviembre de 2024.
- Mainardis, M., Hickey, M., Kaan Dereli, R. (2024). Lifting craft breweries sustainability through spent grain valorisation and renewable energy integration: A critical review in the circular economy framework. *Journal of Cleaner Production*. 447: 141527. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141527>.
- Mezcal y Agaves (2023). Analizando la Relación de la Cerveza en el Medio Ambiente. Obtenido de Mezcal y Agaves: <https://mezcal.org/analizando-la-relacion-de-la-cerveza-en-el-medio-ambiente/> Acceso: 20 de Noviembre de 2024.

- Nyhan, L., Sahin, A., Schmitz, H., Siegel, J., Arendt E. (2023). Brewers' Spent Grain: An Unprecedented Opportunity to Develop Sustainable Plant-Based Nutrition Ingredients Addressing Global Malnutrition Challenges. *J. Agric. Food Chem.* 2023, 71, 10543–10564. DOI: 10.1021/acs.jafc.3c02489.
- Olivares-Galván, S., Marina, M.L., García, M.C. (2022). Extraction of valuable compounds from brewing residues: Malt rootlets, spent hops, and spent yeast, *Trends in Food Science & Technology*. 127: 181-197, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.06.002>.
- Rachwał, K., Waśko, A., Gustaw, K., Polak-Berecka, M. (2020). Utilization of brewery wastes in food industry. *PeerJ* 8:e9427. <https://doi.org/10.7717/peerj.9427>.
- Redacción El Economista (2024). Producción de cerveza en México mantiene dinamismo. Obtenido de El Economista: <https://www.eleconomista.com.mx/los-especiales/Produccion-de-cerveza-en-Mexico-mantiene-dinamismo-20240409-0050.html>. Acceso 25 de Abril 2024
- Sganzerla, W.G., Buller, L.S., Mussato, S.I. Foster-Carneiro, T. (2021). Techno-economic assessment of bioenergy and fertilizer production by anaerobic digestion of brewer's spent grains in a biorefinery concept. *Journal of Cleaner Production*. 297: 126600. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126600>.
- Sganzerla, W. G., Tena, M., Sillero, L., Magrini, F. E., Sophiatti, I. V. M., Gaio, J., Paesi, S., Forster-Carneiro, T., Solera, R., Perez, M. (2023). Application of anaerobic co-digestion of brewery by-products for biomethane and bioenergy production in a biorefinery concept. *BioEnergy Research*, 16(4), 2560-2573. <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10605-7>
- Southey, F. (2021). Fermenting brewers spent yeast into protein: Its the tasties vegan protein in the world. Disponible en <https://www.foodnavigator.com/Article/2021/12/03/Sacchar-Fermented-brewers-spent-yeast-protein-the-tastiest-vegan-protein-in-the-world>. Acceso 20 de Noviembre de 2024.
- The food tech. (2024). Disponible: <https://thefoodtech.com/seguridad-alimentaria/sostenibilidad-en-la-produccion-de-cerveza-tendencias-y-tecnologias-emergentes/#:~:text=La%20transici%C3%B3n%20hacia%20la%20sostenibilidad,del%20suelo%2C%20sino%20que%20tambi%C3%A9n>. Acceso 20 Noviembre 2024.

**Cita**

Aguilar Zárate G., I.E. Martínez Rodríguez, D.U. Santos Ballardo. Cerveza por aquí, cerveza por allá, pero, ¿y dónde queda el desecho? Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (1): 158-173.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0010>

Sometido: 25 de noviembre de 2024

Aceptado: 2 de abril de 2025

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrasco

Laboratory plants:
in vitro cloning

Plantas de laboratorio: clonación *in vitro*

Marco A. Ramírez-Mosqueda^{1*}, Jorge D. Cadena-Zamudio¹,
Esmeralda J. Cruz-Gutiérrez¹ y Gregorio Arellano-Ostoa²

Resumen

Las técnicas de cultivo de tejidos vegetales (CTV) o clonación de plantas ha sido una herramienta de la biotecnología empleada desde hace más de 100 años. Esta técnica permite la obtención de miles o millones de plantas en poco tiempo y espacio, en condiciones de laboratorio. Además, nos permite contar con plantas libres de plagas o enfermedades. Sin embargo, en México esta tecnología no ha sido utilizada al 100 % para resolver el problema en la reproducción de algunas plantas con interés económico. Esto se debe a diferentes factores, entre los más comunes están el desconocimiento del material generado (plantas) por parte de los productores y sociedad en general; seguido de la asociación del cultivo de tejidos vegetales con los organismos genéticamente modificados (OGMs). Sin embargo, es necesario explicar que el cultivo de tejidos vegetales permite obtener plantas clones totalmente seguras para el cultivo y la alimentación humana. También que la biotecnología es una rama de la ciencia que permite el aprovechamiento de los seres vivos.

Palabras clave

Clones, biotecnología, cultivo *in vitro*, seguridad alimentaria.

¹Centro Nacional de Recursos Genéticos-INIFAP, Boulevard de la Biodiversidad No. 400 Rancho las Cruces, C.P. 47600 Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México.

²Colegio de Postgraduados, PREGEP-Fruticultura, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. Km 36.5 Carretera México-Texcoco, C.P. 56264, Texcoco, Estado de México, México.

* Autor de correspondencia: E-mail: marcomosqueda02@hotmail.com



Abstract

Plant tissue culture (PTC) techniques, or plant cloning, have been used as a biotechnology tool for over 100 years. This technique allows the production of thousands or millions of plants in a short time and space, under laboratory conditions. It also allows us to have plants free of pests and diseases. However, in Mexico, this technology has not been fully utilized to solve the problem of reproducing some plants for economic gain. This is due to various factors, among which is the lack of knowledge about the generated material (plants) on the part of producers and society in general; followed by the association of plant tissue culture with genetically modified organisms (GMOs). However, it is necessary to explain that plant tissue culture allows the production of cloned plants that are completely safe for cultivation and human consumption. Also that biotechnology is a branch of science that allows the use of living beings.

Keywords

Clones, biotechnology, *in vitro* culture, food safety.

Introducción

En la actualidad, parece un acto de magia hablar de la clonación de seres vivos o técnicas de la ciencia que permitan desarrollar un individuo idéntico a partir de cualquier célula de su cuerpo. Particularmente, la clonación de plantas ha sido desarrollada desde hace más de un siglo y hoy en día podemos generar miles de copias idénticas a partir de una pequeña porción de tejido vegetal.

El cultivo de tejidos vegetales nos permite generar miles de plantas con el mismo material genético (ADN) de la planta madre, en lapsos de tiempo cortos y espacios sumamente reducidos (Ramírez-Mosqueda y Bello-Bello, 2021). Las plantas se mantienen dentro de un frasco de vidrio que contiene medio de cultivo (similar a una gelatina) en condiciones libres de algún microorganismo contaminante (Fig. 1A). En esa gelatina están presentes nutrientes y fitohormonas que permiten que de una parte de una planta (tejido) madre se logren formar muchas copias (Fig. 1B y 1C).

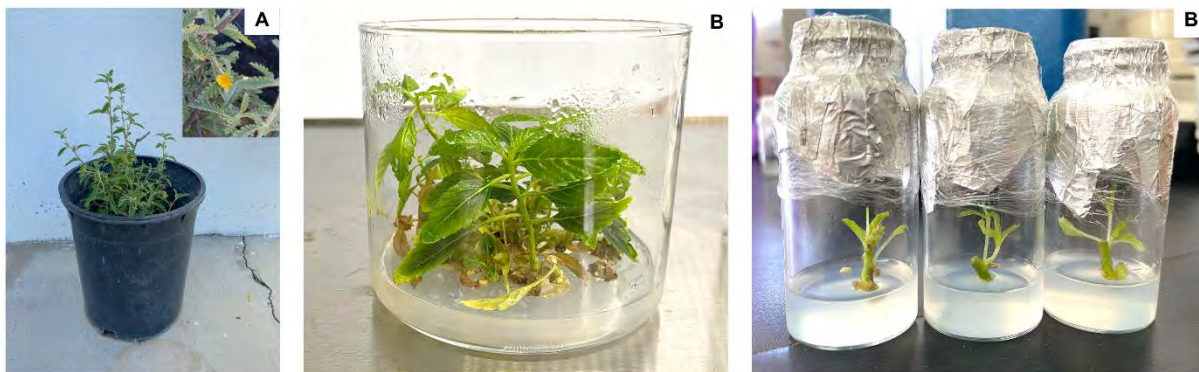


Figura 1. Cultivo de tejidos vegetales. A) Planta madre. B y C) Plantas establecidas en condiciones *in vitro* en medio de cultivo Murashige y Skoog.

Esta técnica de clonación es empleada continuamente en la generación de plantas con interés económico, un ejemplo serían las orquídeas y ornamentales; así como plantas con interés agrícola y/o medicinal que sea necesario tener un gran número para establecer una plantación. Generalmente, el cultivo de tejidos vegetales o cultivo *in vitro* se utiliza en plantas con problemas de propagación debido a baja tasa de germinación o la imposibilidad de generar hijuelos o enraizar estacas para formar otro individuo, entre otras.

Clonación de plantas

La clonación se define como el proceso en el cual se crea una copia idéntica de un individuo, esta copia compartirá las mismas características que en individuo original. En humanos y animales estas prácticas están prohibidas por cuestiones de ética, sin embargo, han existido acciones de clonación de animales como la famosa oveja Dolly en 1994 por científicos escoceses y otros animales a lo largo de la historia. En plantas, esta técnica es más común de lo que parece y desde 1898 el científico Gottlieb Haberlandt aisló células y tejidos de plantas superiores (paltas con semillas) y las colocó en soluciones nutritivas para su crecimiento y estudio. La célula vegetal a diferencia de la célula animal tiene la particularidad de ser totipotente, es decir cualquier célula de una planta contiene información en su material genético (ADN) capaz de generar una planta completa (Fig. 2). Esto sucede siempre y cuando se le suministren nutrientes, vitaminas y una fuente de carbono (energía) (Murashige y Skoog, 1962).

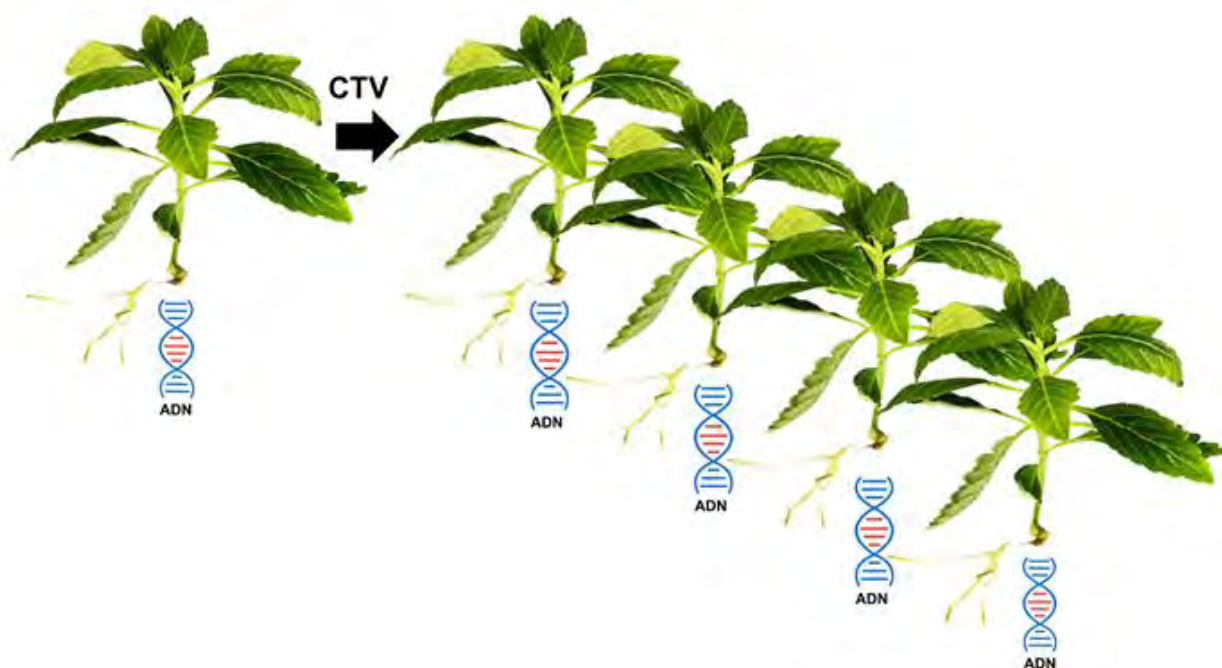


Figura 2. Clonación de plantas a través del cultivo de tejidos vegetales (CTV).

En la actualidad, existen laboratorios que clonan miles de plantas al día haciendo uso de las técnicas de cultivo *in vitro*, estos laboratorios son llamados biofábricas. Estas plantas clonadas sirven para crear campos de cultivo y/o satisfacer las demandas de plantas ornamentales, entre otras utilidades. La gran ventaja de estas técnicas es que se pueden “sacar copias ilimitadas” de una planta, sin embargo, si se quiere garantizar copias genuinas se recomienda no exceder más allá de unos miles de plantas.

Usos de las plantas clonadas

Las plantas que provienen de un proceso de clonación generalmente llamadas plantas *in vitro* son utilizadas en diferentes ámbitos de la vida cotidiana. Por ejemplo, en la agricultura, donde se utilizan las plantas *in vitro* para poder establecer campos de cultivo (Fig. 3). Mientras que en el sector ornamental esta técnica es utilizada para generar un gran número de individuos que son comercializados a un buen precio. En la industria farmacéutica en algunas ocasiones se utiliza el cultivo de tejidos vegetales para generar plantas masivamente y extraer sus compuestos químicos de interés. Aquí debemos hacer un paréntesis, las plantas que se propagan a través del cultivo de tejidos, son organismos vegetales que tienen otro propósito completamente distinto al de OGMs. Las plantas *in vitro* no son modificadas por el humano, simplemente son individuos que se obtienen de los tejidos vegetales de otra planta, sin modificar su material genético (ADN). Estas plantas son seguras en su producción y consumo humano, tanto que están siendo utilizadas en todo el mundo,

en campos de cultivo, como materias primas en industrias e incluso algunas de las plantas ornamentales que se encuentran en tu jardín son productos del cultivo de tejidos vegetales.



Figura 3. Obtención de plantas comerciales.

Ejemplos exitosos en México del uso de cultivo de tejidos vegetales

En la actualidad, estas herramientas de la biotecnología han permitido en el campo de la investigación científica, realizar experimentos en plantas en condiciones controladas (laboratorio). Así mismo en diferentes instituciones y centros de investigación el cultivo de tejidos vegetales permite la obtención de miles de plantas en poco tiempo y espacio. Fuera del ámbito académico y de investigación, existen pocos ejemplos de éxito del uso de estas técnicas de propagación de plantas. El más icónico es la empresa Agromod S.A. de C.V. (ahora fusionada la parte de cultivo *in vitro* con Nature Source Genetics-NSIP) la cual se dedica a la propagación *in vitro* y comercialización de plantas de diferentes cultivos agrícolas. El más representativo es el de papaya, obtenido plantas en laboratorio para después acondicionarlas a condiciones de invernadero y campo, con la intención de comercializar plantas para establecer cultivos comerciales. En años recientes, la instauración de pequeños laboratorios de cultivo de tejidos vegetales ha permitido el emprendimiento de personas, alumnos, científicos y empresarios que han vuelto la mirada a este tipo de propagación de plantas como un negocio rentable. Estos laboratorios se han centrado en la producción de plantas ornamentales, debido al gran costo por unidad y la facilidad de venta de estos productos que no están involucrados en la alimentación.



Perspectivas y consideraciones

En México, existe un desconocimiento de la población sobre las ventajas que ofrece el cultivo de tejidos vegetales, así como del uso y de la seguridad que implican la utilización de estas plantas en las diversas actividades económicas del País. En muchas ocasiones asocian este tipo de “plantas de laboratorio” con los organismos genéticamente modificados (OGM) conocidos como transgénicos. Sin embargo, como ya se mencionó la finalidad de propagación *in vitro* de plantas es obtener clones de las plantas madre y no se realizan modificaciones genéticas en su material genético (ADN). Por tanto, el uso en la agricultura es sumamente seguro, así como en la industria y otros sectores del país.

Mientras en otros países del mundo ya se está aprovechando la producción masiva de plantas *in vitro* en biofábricas para su comercialización, ejemplo Estados Unidos, Cuba y Países Bajos, entre otros. Aquí en México se han realizado intentos de la implementación de estas técnicas para la obtención de plantas. Sin embargo, es complicado fomentar el uso de tecnología novedosas, cuando por años se han practicado la reproducción de plantas por semillas o a través de esquejes (hijuelos). Un ejemplo en el campo mexicano sería que a los productores no les interesan estos materiales generados en laboratorio, debido al arraigo que tienen en las técnicas convencionales de propagación de plantas (semillas e hijuelos). Pero es más por el desconocimiento que presentan hacía innovaciones no convencionales, que generan un mayor número de plantas en menor tiempo. Por tanto, es necesario fomentar y demostrar ante los propios ojos de los productores y consumidores las ventajas del cultivo *in vitro*, utilizando parcelas demostrativas, campos experimentales, exposiciones, campañas de mercadotecnia, etc. Para hacer frente al futuro en cuestiones alimentarias y/o de recursos naturales que involucren plantas de por medio, es necesario actualizarnos en términos de métodos innovadores de propagación vegetal. El futuro de la biotecnología vegetal nos ha alcanzado y nuestro país no se puede quedar atrás.

Referencias

- Murashige, T., & Skoog, F. 1962. *A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures*. *Physiologia plantarum* 15, 473-497.
- Ramírez-Mosqueda, M. A., & Bello-Bello, J. J. 2021. SETIS™ bioreactor increases *in vitro* multiplication and shoot length in vanilla (*Vanilla planifolia* Jacks. Ex Andrews). *Acta Physiologiae Plantarum*, 43(4), 52.

Cita

- Ramírez-Mosqueda M.A., J.D. Cadena-Zamudio, E.J. Cruz-Gutiérrez, G. Arellano-Ostoa. Plantas de laboratorio: clonación *in vitro*. *Recursos Naturales y Sociedad*, 2025. Vol. 11 (1): 175-181. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0011>

Sometido: 25 de septiembre de 2024

Aceptado: 2 de abril de 2025

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrasco

**Coral bleaching as a consequence of climate change:
coral reefs of the Gulf of California**

Los arrecifes coralinos del Golfo de California ante el cambio climático

**Martínez-Sarabia Paulina¹, Zenteno-Savín Tania^{1*},
Valenzuela-Quíñonez Fausto¹ y Reyes-Bonilla Héctor²**

Resumen

Los arrecifes coralinos son estructuras calcáreas construidas principalmente por corales duros; estos ecosistemas albergan una gran biodiversidad marina y aportan servicios ecosistémicos al planeta y a la humanidad. Recientemente se han reportado mortalidades en los arrecifes coralinos de todo el mundo debido al blanqueamiento coralino asociado al cambio climático. Los cambios prolongados en la temperatura del mar afectan a los corales provocando una ruptura del equilibrio fisiológico del coral, que afecta su simbiosis y los lleva al “blanqueamiento” del coral; si estos cambios se prolongan durante semanas, el coral se debilita y comienza a morir. En el Golfo de California se han reportado varios eventos de blanqueamiento coralino, desde la década de los 80 ´s hasta el más reciente en el 2023-2024. De acuerdo con los reportes de las afectaciones en la cobertura coralina, las mortalidades son menores en el Golfo de California en la mayoría de los casos; esto podría indicar que las comunidades coralinas en esta zona tienen cualidades que les permiten recuperarse ante retos ambientales. Desafortunadamente, el blanqueamiento se presenta cada vez con mayor intensidad y frecuencia, por lo que debemos elevar esfuerzos para conocer lo que esto implica para los arrecifes coralinos del planeta. Este artículo busca resaltar la relevancia de los ecosistemas coralinos del Golfo de California, aumentar nuestro conocimiento sobre el blanqueamiento de coral, y promover alternativas para la conservación de los arrecifes coralinos.

Palabras clave

Arrecifes, blanqueamiento coralino, cambio climático, corales duros, Golfo de California.

¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Planeación Ambiental y Conservación. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096 – México.

²Universidad Autónoma de Baja California Sur. Departamento Académico de Ciencias Marinas y Costeras. Carretera al sur km 5.5., La Paz, Baja California Sur, C.P. 23090, México

* Autor de correspondencia: E-mail: zenteno04@cibnor.mx (612) 123-8502



Abstract

Coral reefs are calcareous structures constructed mainly by hard corals; these ecosystems are home to a large marine biodiversity and provide ecosystem services to the planet and to humanity. Recently, reef mortalities have been reported worldwide due to coral bleaching associated with climate change. Prolonged changes in sea temperature affect corals disrupting their physiological balance, affecting symbiosis and leading to 'bleaching'; if these changes last for weeks, the coral weakens and begins to die. Several coral bleaching events have been reported in the Gulf of California, from the 1980s to the most recent in 2023-2024. According to reports of damage to coral cover, in most cases mortalities are few; this may indicate that coral communities in the Gulf of California have qualities that allow them to recover in the face of environmental challenges. Unfortunately, coral bleaching is occurring with increasing intensity and frequency, so we must increase our efforts to understand what this means to the planet's coral reefs. This article seeks to highlight the relevance of coral ecosystems, what we know about coral bleaching, and to promote alternatives for coral reef conservation.

Keywords

Coral Bleaching, climate change, Gulf of California, hard corals, reefs.

Introducción

¿Que son los arrecifes coralinos?

Los arrecifes coralinos se distribuyen entre los trópicos en un amplio rango territorial de los 30° S a los 30° N, pues necesitan aguas cálidas, soleadas, alcalinas, transparentes y con pocos nutrientes (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2017) para sobrevivir. Son ecosistemas marinos sumamente sensibles a cambios ambientales, solamente se desarrollan en aguas someras (0-50 m de profundidad; Glynn *et al.*, 2017) y con temperaturas de 25 a 30° C (Veron 1995); es por esto que los encontramos distribuidos entre el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio (Fig 1).

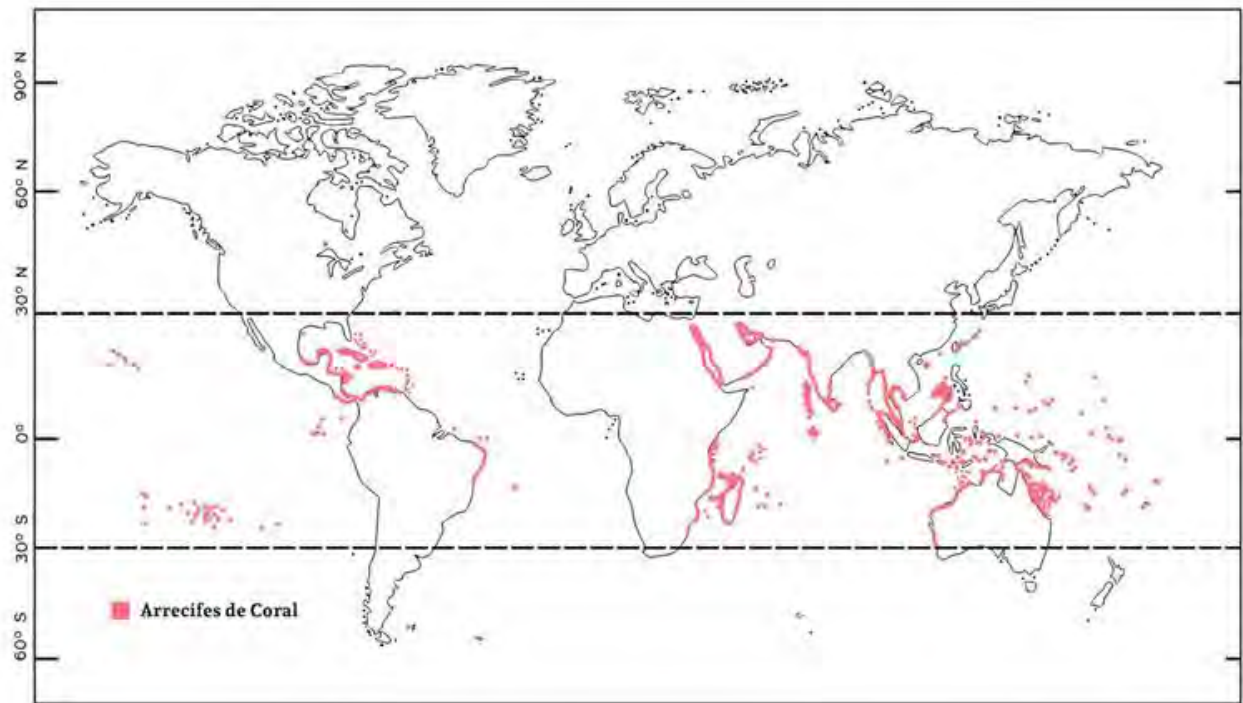


Figura 1. Distribución mundial de los arrecifes coralinos. Tomada de Landuum (2024).

Los arrecifes coralinos ocupan el 0.1% de la superficie terrestre y, a pesar de ocupar tan poco territorio, albergan más del 25% de las especies marinas, incluyendo algas, bivalvos, equinodermos, moluscos, crustáceos, peces, tortugas y mamíferos marinos (Fig. 2).



Figura 2. Arrecife coralino biodiverso en el islote de San Rafaelito, Bahía de La Paz, Baja California Sur. Fotografía de Victoria Belén Muñoz Jiménez.

Los corales son animales invertebrados coloniales conformados por múltiples individuos llamados “pólipos” (Fig. 3). Existen dos grupos de corales, los corales blandos y los corales duros; los últimos son los constructores de arrecifes, pues tienen la capacidad de depositar carbonato de calcio e ir creciendo su esqueleto con el tiempo, formando una estructura sobre la cual crecen otros organismos. Los corales duros también se caracterizan por vivir asociados a unas microalgas conocidas comúnmente como “zooxantelas” (del griego Zoo-animal, *Xanthos*-amarillo), las cuales viven dentro de sus células. Esta asociación les brinda a ambos, el pólipo (hospedero) y la zooxantela (huésped), beneficios mutuos (relación simbiótica) pues el pólipo aporta un lugar donde vivir y algunos nutrientes, y la microalga brinda múltiples requerimientos nutricionales y energéticos a los pólipos (Rodríguez-Troncoso y Tortolero-Langarica, 2014).



Figura 3. Acercamiento a los pólipos de un coral *Pocillopora* spp. Fotografía de Victoria Belén Muñoz Jiménez. Anatomía de un pólipo de coral. Imagen tomada de ideasmarinas.com, junio 2024.

¿Cuál es la importancia de los arrecifes coralinos?

Los arrecifes coralinos aportan múltiples servicios ecosistémicos al planeta. Por ejemplo, funcionan como hábitat para algas y animales marinos, brindan protección a las costas contra eventos meteorológicos, mejoran la calidad del agua, son una atracción turística, fuente de trabajo para comunidades locales, proveen de alimento a las comunidades aledañas, e incluso son potenciales reservorios para la producción de medicamentos contra enfermedades como el cáncer, artritis, Alzheimer, infecciones virales o bacterianas (AIDA, 2018; Fig. 4). De esta manera, las personas se benefician, directa o indirectamente de estos ecosistemas; un claro ejemplo de beneficios directos es el recurso pesquero que proporciona seguridad alimentaria a las poblaciones aledañas. Estudios recientes demuestran que los arrecifes coralinos generan alrededor de \$105,000 a \$350,000 dólares estadounidenses por hectárea por año a la economía mundial por los bienes y servicios que otorgan (Edwards *et al.*, 2024).



Figura 4. Servicios ecosistémicos que aportan los arrecifes coralinos.

La salud de los humanos está directamente relacionada con la salud del ecosistema arrecifal coralino. Desde la nutrición por el consumo de pescados, mariscos y algas; la protección costera contra huracanes y tormentas tropicales anuales, pues los arrecifes funcionan como primera línea de defensa al frenar la fuerza del oleaje; el aporte económico a comunidades locales como pescadores y/o prestadores de servicios turísticos (entre otras); las medicinas obtenidas a base de algas o animales que viven en el arrecife coralino; y la salud mental al realizar actividades recreativas como nadar, hacer esnórquel o bucear. ¡Es increíble darnos cuenta de todos los servicios que brindan los arrecifes coralinos!

¿Qué tipo de corales encontramos en el Golfo de California?

En el Golfo de California, los arrecifes coralinos no son comunes (Reyes-Bonilla y López-Pérez, 2009). Diversos estudios en el área, desde 1959, reconocen aquellos ubicados en el extremo sur de la Península de Baja California, como Cabo Pulmo, Los Frailes y bahía San Gabriel (Reyes-Bonilla et

al., 2014; Spalding *et al.*, 2001; Fig. 5). Mayormente encontramos arrecifes rocosos con abundantes comunidades coralinas que cumplen funciones y servicios ecosistémicos muy similares a un arrecife estrictamente coralino. Para mencionar algunos sitios, están Las Navajas y San Gabriel, ubicados dentro del Parque Nacional Zona Marina del Archipiélago de Espíritu Santo, que cuentan con una cobertura coralina tal que forma una gran barra de corales constructores de arrecife dominado por el género *Pocillopora* (Navarrete-Torices *et al.*, 2023).

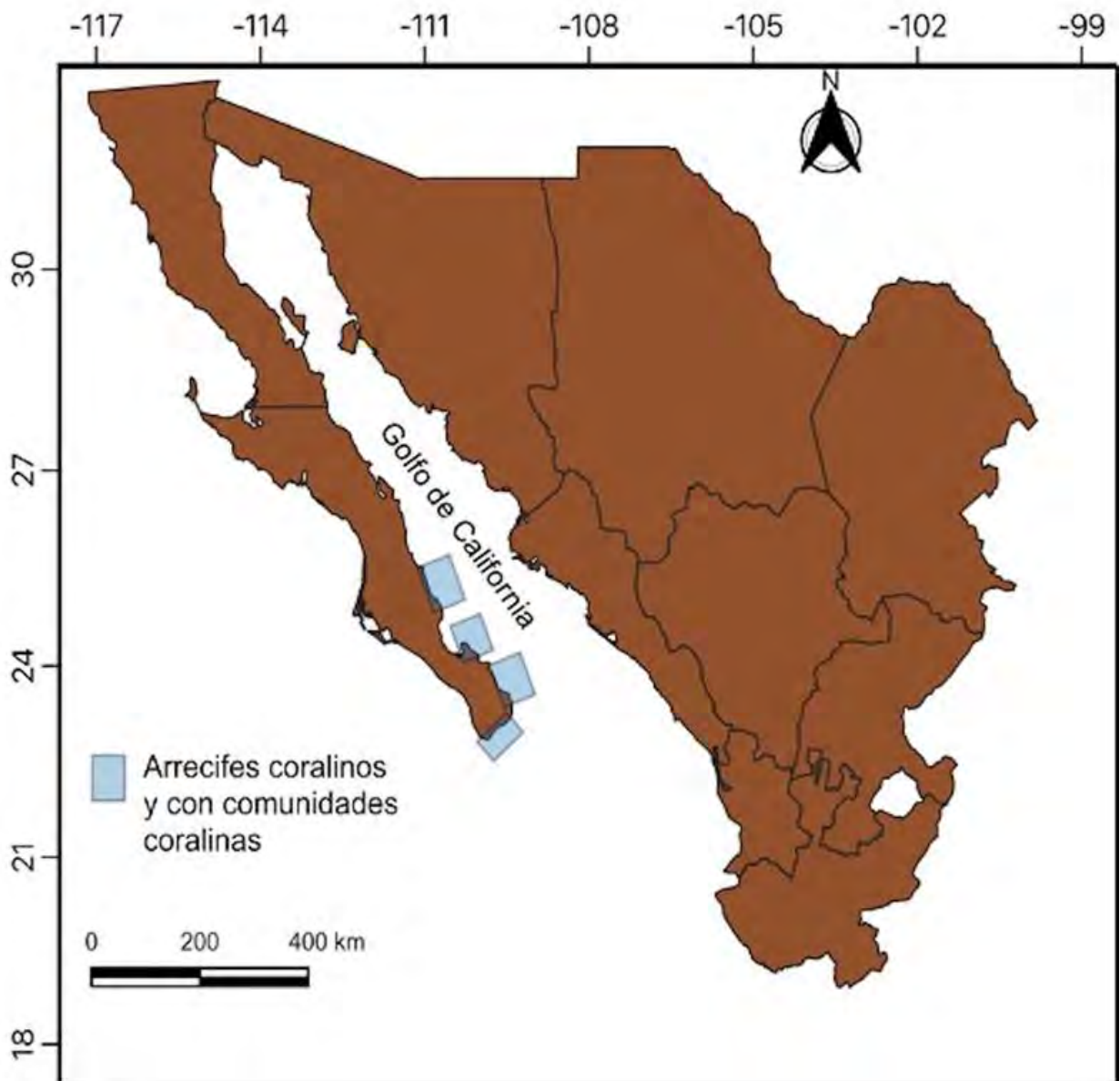


Figura 5. Ubicación de arrecifes en la parte sur del Golfo de California.



¿Qué es el cambio climático?

El término cambio climático se refiere a cambios en las temperaturas y patrones climáticos; estas variaciones naturales están influenciadas por procesos como erupciones volcánicas o actividad solar (United Nations, 2024). Dichas variaciones climáticas son alteradas por actividades humanas desde 1800, por factores como la quema de combustibles fósiles y la acumulación de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, vapor de agua, entre otros) (Nunez, 2023). Recientemente, se han reportado disminuciones en la cobertura y estructura de los arrecifes coralinos en todo el planeta relacionadas al cambio climático. El aumento en la frecuencia e intensidad de las tormentas tropicales y huracanes impacta los corales impidiendo su recuperación natural con el tiempo. El aumento en la temperatura del mar y la acidificación de los océanos, causados por una mayor concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, afectan su estructura y causan “blanqueamiento” coralino en muchas partes del mundo.

¿Qué es el “blanqueamiento” coralino y por qué está acabando con los arrecifes?

El blanqueamiento de los corales (Fig. 6) es una respuesta fisiológica al estrés entre la simbiosis del pólipo y del alga, comienza por la inanición (malnutrición grave causada por la falta de alimento) del coral, provocada por la expulsión del alga al medio. En consecuencia, los corales pierden su color, y se le denomina “blanqueamiento”. Si las condiciones en el ambiente (aumento en la temperatura del mar, mareas extremadamente bajas, contaminación, enfermedades) persisten durante semanas, el alga no vuelve a colonizar el pólipo coralino, pues no encuentra un espacio que propicie la unión, ocasionando la muerte del coral.



Figura 6. Imagen de un arrecife con colonias coralinas *Pocillopora* spp. con signos evidentes de blanqueamiento. Localidad de San Juan Nepomuceno, Bahía de La Paz, Baja California Sur, agosto de 2023. Fotografías de Azucena Villegas Parada.

Han ocurrido varios eventos de blanqueamiento y mortalidad coralina en el Pacífico Oriental Tropical ocasionados por el fenómeno atmosférico de El Niño que, con el paso del tiempo y el cambio climático, aumenta su intensidad. Pero **¿qué es el evento meteorológico de El Niño?** El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es un fenómeno de variación climática natural ocasionado por inestabilidad en la presión atmosférica como el debilitamiento de los vientos ecuatoriales. El ENOS se da en ciclos irregulares, desde dos hasta siete años, y tiene tres fases que son El Niño, La Niña y la fase neutra. El Niño conlleva calentamiento en la superficie del mar (hasta 4° C más de lo normal) y la supresión de la corriente de agua fría en el Océano Pacífico Ecuatorial. La Niña se caracteriza por un enfriamiento por debajo de la temperatura media en la misma región, además de una intensificación de los vientos de este a oeste (OMS, 2024). En condiciones ENOS neutras, los vientos alisios de superficie soplan hacia el oeste a través del océano Pacífico ecuatorial; estos vientos dan lugar a una corriente hacia el oeste empujando las aguas más cálidas hacia Indonesia y Australia. Las condiciones neutras también favorecen el afloramiento de agua marina fría y rica en nutrientes en la costa norte del Pacífico de Sudamérica (NOAA, 2024)

¿Qué tipo de eventos de blanqueamiento coralino han ocurrido en el pasado en el Golfo de California?

Durante el ENOS de 1987, se reportó blanqueamiento en el arrecife coralino de Cabo Pulmo. Sólo en los corales del género *Pocillopora* se reportó 17% de blanqueamiento; sin embargo, en un monitoreo realizado en marzo de 1988, las colonias de coral se encontraron recuperadas, regresando a su coloración normal (Reyes-Bonilla, 1993). En ese mismo evento (1988), también se registraron colonias coralinas blanqueadas dispersas en una localidad cercana a Cabo San Lucas (Wilson, 1988).

Durante el ENOS de 1997-1998, en el Pacífico Oriental Tropical (Glynn, 2000), se registraron efectos en los corales de las costas mexicanas, incluyendo la parte sur del Golfo de California, donde se registró blanqueamiento coralino del 30% en el pico máximo de este evento; pero al final del año sólo se registró mortalidad del 18% en los corales (Reyes-Bonilla, 2001). Comparado con otras regiones del Pacífico Oriental Tropical, el Golfo de California sufrió menor impacto durante el mismo evento.

En el año 2008 se registró otro blanqueamiento coralino en la parte sur del Golfo de California (La Paz y Loreto, Baja California Sur) excepto que, en este caso, el blanqueamiento se debió a bajas temperaturas ($17.5 \pm 0.32^\circ \text{C}$) en el agua del mar; desde 25 años atrás, no se habían detectado disminuciones de la temperatura del mar más allá del nivel crítico inferior. En La Paz, Baja California



Sur se detectó el 90% de las colonias blanqueadas y, de éstas, el 20% murió; mientras que en Loreto se blanquearon 99% de las colonias, y el 96% no sobrevivió (Hernández *et al.*, 2010).

En febrero de 2023 inició el 4to evento de blanqueamiento coralino masivo en todo el mundo debido a las altas temperaturas ocasionadas por ENOS. En respuesta a estos eventos, se comenzaron a registrar colonias coralinas blanqueadas en el Golfo de California, específicamente en los sitios de Cabo Pulmo y en el parque marino Archipiélago de Espíritu Santo de La Paz, desde agosto de 2023 alcanzando porcentajes del 60% (Reyes-Bonilla *et al.*, 2024).

De acuerdo con las predicciones de modelos climáticos, se estima que los impactos de blanqueamiento a los arrecifes coralinos aumentarán en frecuencia y severidad a través de los años. Esto no significa que forzosamente se vayan a perder los arrecifes coralinos del planeta; sin embargo, definitivamente se debe seguir haciendo investigación para conocer el comportamiento de las poblaciones coralinas ante dichos cambios ambientales, y posteriormente proponer medidas adecuadas para su manejo. Así como reducir las condiciones que propician el blanqueamiento de coral para que estos ecosistemas puedan recuperarse y persistir.

Perspectivas y consideraciones

Debemos tener en cuenta que la calidad del agua es un aspecto muy importante para mantener sanos los arrecifes. Las descargas de aguas residuales y de desechos tóxicos (agroquímicos, herbicidas, productos farmacéuticos) al océano afecta gravemente los corales. Lo mismo sucede con procesos como la tala y el desmonte pues, en ausencia de vegetación, la lluvia deslava el terreno, desembocando en el océano saturando el agua de mar con nutrientes y sedimentos que afectan a los corales; además, con menos árboles hay acumulación de gases en la atmósfera (dióxido de carbono, entre otros). Es nuestra responsabilidad como ciudadanos exigir a nuestros representantes políticos proteger un ecosistema tan valioso, y atacar las causas que promueven su pérdida. Promover y ejercer acciones que ayuden a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero (como usar menos el automóvil particular y más el transporte público y/o la bicicleta, disminuir nuestros consumos día con día, usar más artículos de segunda mano, reparar y reciclar) también contribuyen a la conservación de los arrecifes coralinos.

Se han promovido estrategias directas de manejo para promover la resiliencia de este ecosistema, entre ellas, herramientas para disminuir el número de brotes de depredadores coralinos (Martínez-

Sarabia y Reyes-Bonilla 2021), reducir la pérdida de estructura arrecifal, promover programas de restauración coralina, y reducir malas prácticas de pesca y turismo que afectan los arrecifes coralinos (McLeod *et al.*, 2020). El Programa de Conservación de Arrecifes de Coral de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) ha integrado prácticas de gestión basadas en la resiliencia y ha enfatizado la restauración de corales en su plan estratégico de 2018. Por ejemplo, en su Plan de Acción, la Iniciativa Internacional de Arrecifes Coralinos (ICRI) comparte propuestas, basadas en las lecciones aprendidas de las olas de calor en Florida y el Caribe, incluyendo intervenciones con programas de restauración coralina aunados a la investigación científica para mejorar las prácticas y el manejo (ICRI, 2024; NatGeo, 2024).

Otras maneras de ayudar a los arrecifes coralinos incluyen realizar prácticas de buceo responsables, usar protectores solares amigables con los corales que no contengan oxibenzonas ni octinoxatos (The Nature Conservancy, 2022). Todas las acciones que ayuden a disminuir los efectos del cambio climático aportan de buena manera al cuidado de los arrecifes coralinos.

Agradecimientos

Los autores agradecen los comentarios de los revisores anónimos por sus contribuciones editoriales al manuscrito, al IBQ. O. Lugo-Lugo por su apoyo en el laboratorio de Estrés Oxidativo del CIBNOR, y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada para Estancias Posdoctorales por México a PMS (CVU 514329).

Referencias

- Dajer, J. 2024. Arrecifes artificiales. Landuum. En: <https://www.landuum.com/tendencias/la-creacion-de-un-ecosistema-con-arrecifes-artificiales/> (consultado el 23/09/2024).
- Edwards, A., J. Guest, y A. Humanes. 2024. Rehabilitating coral reefs in the Anthropocene. *Current Biology* 34: 399-406.
- Glynn, P. W. 2000. Effects of the 1997–98 El Niño–Southern Oscillation on eastern Pacific corals and coral reefs: An overview. *Proceedings 9th International Coral Reef Symp.*, Bali, Indonesia.
- Glynn, P. W., A. B. Mones, G. P. Podestá, A. Colbert y M. W. Colgan. 2017. El Niño–Southern



- Oscillation: effects on Eastern Pacific coral reefs and associated biota. *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific: Persistence and loss in a dynamic environment*, 251-290.
- Hernández, L., H. Reyes-Bonilla y E. F. Balart. 2010. Efectos del blanqueamiento del coral por baja temperatura en los crustáceos decápodos asociados a arrecifes del suroeste del Golfo de California. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 81:113- 119.
- Hoegh-Guldberg, O., E. S. Poloczanska, W. Skirving, y S. Dove. 2017. Coral reef ecosystems under climate change and ocean acidification. *Frontiers in marine science* 4: 1-20.
- International Coral Reef Initiative. 2024. Guidance Document on Integrating Coral Reefs and Associated Ecosystems into National Biodiversity Strategies and Action Plans. En: https://icriforum.org/wp-content/uploads/2024/03/ICRI_Integration_Coral_Reefs_NBSAPs_Guidance_2024_FINAL_V3.pdf (consultado el 05/06/2024)
- Martínez-Sarabia, P., y H. Reyes-Bonilla. 2021. Damage caused by crown-of-thorns (*Acanthaster cf. solaris*) outbreak to restored corals in the southern Gulf of California, Mexico. *Bulletin of Marine Science* 97(2): 329-336.
- McLeod, I. M., D. Bourne, D. M. Ceccarelli, L. Boström-Einarsson, N. Cook, S. E. Fulton, B. Hancock, P. Harrison, M. Hein, A. Le Port, R. Paewai-Higgins, H. A. Smith y A. Smith. 2020. Best practice coral restoration for the Great Barrier Reef: Synthesis of results. Report to the National Environmental Science Program. Reef and Rainforest Research Centre Limited, Cairns. 36pp.
- Navarrete-Torices, C. R., H. Reyes-Bonilla y R. A. Cabral-Tena. 2023. Descripción de la funcionalidad física en los arrecifes de coral de Isla Espíritu Santo, La Paz, Baja California Sur. *Hidrobiológica* 33 (2): 191-200.
- National Geographic España. 2024. Las altas temperaturas provocan un nuevo blanqueamiento masivo de corales. En: https://www.nationalgeographic.com.es/medio-ambiente/alerta-global-por-cuarto-evento-blanqueamiento-corales_22052 (consultado el 16/05/2024)
- National Oceanic and Atmospheric Administration. What is El Niño -Southern Oscillation (ENSO)? En: <https://www.weather.gov/mhx/ensowhat> (consultado el 27/06/2024)
- Nunez, C. 2023. ¿Qué son los gases de efecto invernadero y cuáles son sus efectos?. En: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/gases-efecto-invernadero-que-son-hacen> (consultado el 21/05/2024)
- Organización Mundial de la Salud. 2024. El Niño- Oscilación del Sur (ENOS). En:

[https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/el-nino-southern-oscillation-\(enso\)](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/el-nino-southern-oscillation-(enso))
(consultado el 31/05/2024).

- Reyes Bonilla, H. 1993. The 1987 coral reef bleaching at Cabo Pulmo reef, Gulf of California, Mexico. *Bulletin of Marine Science* 52: 832–837.
- Reyes Bonilla, H. 2001. Effects of the 1997-1998 El Niño-Southern Oscillation on coral communities of the Gulf of California, Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 69(1): 251–266.
- Reyes-Bonilla, H., R. A. López-Pérez. 2009. Corals and coral-reef communities in the Gulf of California. In: Johnson ME, Ledesma-Vásquez J (eds.), *Atlas of Coastal Ecosystems in the Gulf of California. Past and Present*. University of Arizona Press 45–57.
- Reyes Bonilla H., P.A. Álvarez del Castillo Cárdenas, L. E. Calderón Aguilera, C. E. Erosa Ricárdez, F.J. Fernández Rivera, T.C. Melo Frausto, B.M. Luna Salguero, X.G. Moreno Sánchez, M.C. Mozqueda Torres, C.O. Norzagaray López y D Petatán Ramírez. 2014. Capítulo 3: Servicios ambientales de arrecifes coralinos: El caso del Parque Nacional Cabo Pulmo, Baja California Sur. Primera edición. Universidad Autónoma de Baja California Sur. La Paz, Baja California Sur, México. 227pp.
- Reyes Bonilla H., A. Robles-Payán y R. Meléndez Rosas. 2025. Blanqueamiento de coral en el Golfo de California: impactos sociales y ecológicos. *La Jornada Ecológica*. 285: 23-24.
- Rodríguez-Troncoso A.P. y A. Tortolero-Langarica. 2014. Capítulo 3: Corales: Organismos base constructores de los ecosistemas arrecifales. *Temas sobre investigaciones costeras*. Universidad de Guadalajara. Primera edición. Universidad de Guadalajara. Puerto Vallarta, México.
- Spalding, M., C. Revillious y E. P. Green. 2001. *World atlas of coral reefs*. University of California Press, Berkeley, USA. 424 pp.
- The Nature Conservancy. 2022. 8 easy ways you can help coral reefs. September 08,2022. En: <https://www.nature.org/en-us/what-we-do/our-priorities/protect-water-and-land/land-and-water-stories/8-easy-ways-you-can-help-coral-reefs/> (consultado el 29/04/2024)
- United Nations. 2024. United Nations. Climate action. En: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change> (consultado el 21/05/2024)



- Thompson, D. C. 2018. ¿Sabías que los arrecifes producen medicinas?. AIDA. <https://aida-americas.org/es/blog/sabias-que-los-arrecifes-producen-medicinas#:~:text=Es%20por%20ello%20que%2C%20según,y%20enfermedades%20card%C3%ADacas%2C%20entre%20otras> (consultado el 16/03/2024)
- Veron J. E. N. 1995. Corals in space and time: the biogeography and evolution of the Scleractinia. University of New South Wales Press, Sydney, Australia. 321 pp.
- Wilson, E. C. 1988. The hermatypic coral Pocillopora at Cabo San Lucas, Mexico. Bulletin of the Southern California Academy of Sciences 87: 79-83.

Cita

Martínez-Sarabia P., T. Zenteno-Savín, F. Valenzuela-Quñones, H. Reyes-Bonilla. Los arrecifes coralinos del Golfo de California ante el cambio climático. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (1): 183-196. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0012>

Sometido: 17 de octubre de 2024

Aceptado: 30 de abril de 2025

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrasco

**Circular economy:
Response to the waste management crisis**

Economía circular: Respuesta a la crisis de manejo de residuos

**Selene Ortíz Velazquez^{1*}, Iván Cervantes-Zepeda¹, David García-Mondragón¹,
Iván Gallego-Alarcón¹ y Gehovana González-Blanco¹**

Resumen

La economía circular (EC) representa una solución clave para los problemas ambientales del siglo XXI, como la escasez de recursos y el aumento de residuos. A diferencia del modelo lineal, que sigue el patrón de "tomar, hacer, desechar", la EC fomenta la reutilización, el reciclaje y la reparación de productos para prolongar su vida útil, lo que contribuye a reducir la generación de residuos y optimizar el uso de los recursos. Aunque la EC ha ganado importancia en ciertos sectores, la implementación en políticas públicas sigue siendo limitada. Para ser verdaderamente efectiva, la EC debe integrarse en un enfoque de desarrollo sostenible, que contemple tanto los aspectos económicos como los sociales. La adecuada gestión de residuos —clasificados en peligrosos, de manejo especial y sólidos urbanos— es fundamental para mitigar su impacto, adoptando prácticas como la optimización de recursos, la valorización de residuos, la educación ambiental, políticas que prioricen las inversiones en los sistemas de recolección, de localización de cadenas de suministro, el reciclaje y la recuperación sustentable, con el fin de reducir la contaminación, al tiempo de brindar beneficios económicos para avanzar hacia una sostenibilidad a largo plazo.

Palabras clave

Gestión de residuos, sostenibilidad, valorización de desechos.

¹ Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México.

* Autor de correspondencia: E-mail: selnov16@gmail.com



Abstract

Circular economy (CE) represents a key solution to the environmental problems of the 21st century, such as resource scarcity and increasing waste. Unlike the linear model, which follows the "take, make, dispose" pattern, CE promotes the reuse, recycling, and repair of products to extend their lifespan, which helps reduce waste generation and optimize resource use. Although CE has gained importance in certain sectors, its implementation in public policies remains limited. To be truly effective, CE must be integrated into a sustainable development approach that considers both economic and social aspects. Proper waste management — classified into hazardous, special handling, and municipal solid waste — is essential to mitigate its impact by adopting practices such as resource optimization, waste recovery, environmental education, policies that prioritize investments in collection systems, supply chain localization, recycling, and sustainable recovery, aiming to reduce pollution while providing economic benefits to move towards long-term sustainability.

Keywords

Waste management, sustainability, waste valorization.

Introducción

Debido al crecimiento poblacional y el desarrollo industrial, la generación de residuos se incrementa cada día, lo cual genera una diversa cantidad de problemas tales como proliferación de fauna nociva, contaminación del agua, suelo y aire. Así mismo, el desarrollo urbano genera necesidades, las cuales son cubiertas mediante la sobreexplotación de los recursos naturales generando la escasez de estos. De esta manera, el aumento en la generación de residuos y la sobreexplotación de recursos se destacan como dos de los problemas ambientales más críticos del siglo XXI. Frente a estos desafíos, la economía circular (EC) surge como una solución innovadora, proponiendo un modelo de producción y consumo más responsable y eficiente. No obstante, aunque este enfoque ha ganado importancia en los debates internacionales, su implementación en políticas públicas y en las agendas de muchas instituciones y gobiernos siguen siendo limitada, a pesar de que algunas empresas líderes ya lo han adoptado (Marcet y Vergés, 2018).

¿Qué es la Economía Circular?

La EC es un modelo de producción y consumo basado en los principios de reutilizar, reparar, renovar y reciclar productos y materiales, con el objetivo de extender su ciclo de vida el mayor tiempo posible. A diferencia del modelo lineal tradicional, que sigue el esquema de "extraer, producir, consumir y desechar", la EC busca cerrar este ciclo, maximizando el aprovechamiento de los recursos disponibles y transformando los residuos en nuevos productos útiles (Fraire *et al.*, 2023).

Uno de los principales objetivos de la EC es fomentar el desarrollo sostenible a través del concepto de las 9R: rechazar (R1), repensar (R2), reducir (R3), reutilizar (R4), reparar (R5), restaurar (R6), remanufacturar (R7), reciclar (R8) y recuperar (R9) (Fig. 1).

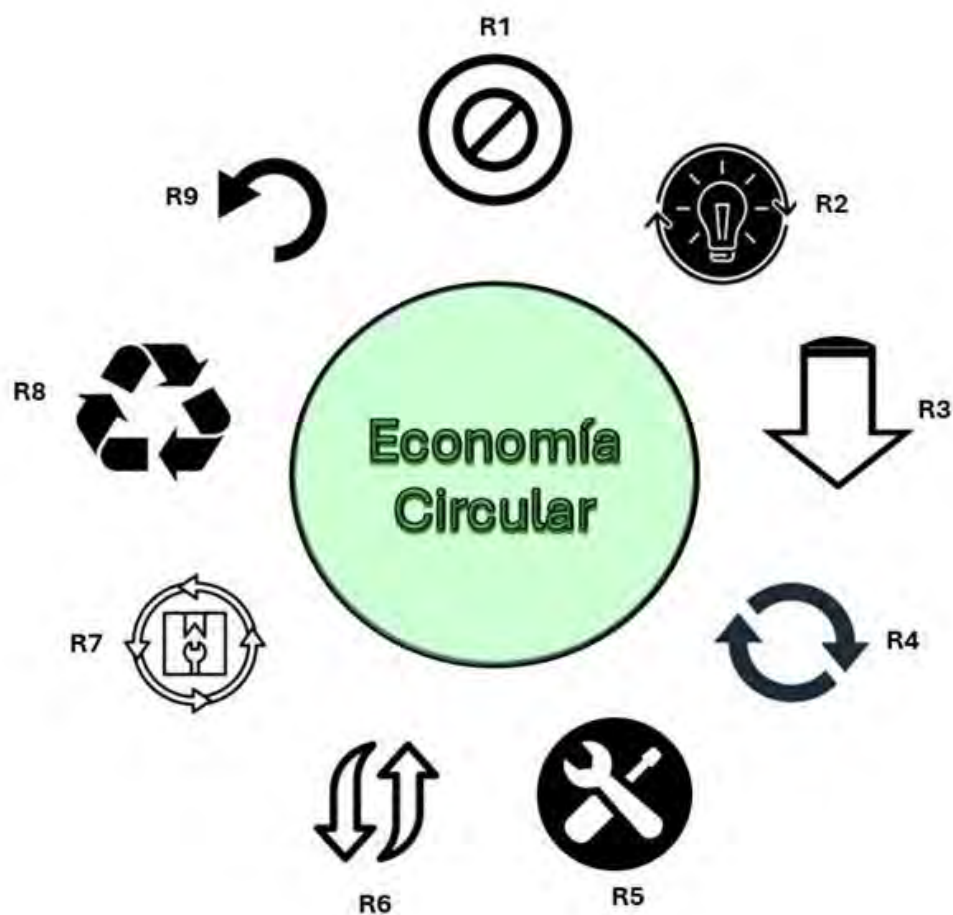


Figura 1. Regla de las 9R de la economía circular: rechazar (R1), repensar (R2), reducir (R3), reutilizar (R4), reparar (R5), restaurar (R6), remanufacturar (R7), reciclar (R8) y recuperar (R9).



En términos generales, estas acciones buscan aprovechar los materiales provenientes de los residuos para generar nuevos productos, reduciendo la explotación de los recursos naturales, minimizando la generación de residuos y fomentando el reciclaje. Estas acciones promueven un cambio hacia un modelo más sostenible y respetuoso con el medio ambiente, cerrando así el ciclo de vida de los recursos (Morocho, 2018; Melendez *et al.*, 2021; Muñoz *et al.*, 2024).

Beneficios de la Economía Circular

Adoptar la EC a gran escala puede tener un impacto positivo, tanto a nivel doméstico como industrial, promoviendo un cambio hacia un modelo más sostenible y respetuoso con el medio ambiente, creando valor al conservar recursos, reducir residuos y disminuir la contaminación. Además, fomenta la valorización de los residuos (Fig. 2), tratándolos como recursos valiosos para ser reciclados o reutilizados (Graziani, 2018; Mulder y Albaladejo, 2020).



Figura 2. Valorización de un residuo.

Implementar políticas y tecnologías innovadoras en la gestión de residuos es clave para asegurar la efectividad y sostenibilidad de este modelo a largo plazo. De esta manera, se contribuye a un futuro más sostenible mediante estrategias orientadas a la conservación del medio ambiente (Barragán y Barragán, 2017; Cosavalente y Gonzales, 2022; Wandurraga, 2020).

Modelo de economía circular en acción

En la práctica, la EC organiza las actividades económicas de forma que los desechos generados en un proceso se transformen en recursos para otros. Este enfoque busca un sistema más interconectado y eficiente, promoviendo la filosofía de "residuos cero" y desvinculando el crecimiento económico de la explotación de recursos naturales (Fraire *et al.*, 2023).

Dentro de este marco, la EC abarca varias áreas clave, desde la restauración y regeneración de productos hasta la optimización de recursos. Esta visión abre nuevas posibilidades para avanzar hacia una sostenibilidad integral (Tabla 1).

Así mismo, la EC está estrechamente vinculada con la gestión de residuos, ya que la generación de residuos se ha convertido en una problemática de creciente importancia, impactando tanto a países desarrollados como a aquellos en vías de desarrollo.

Este fenómeno no solo genera un impacto negativo en el entorno, sino que también representa un desafío crítico para su gestión adecuada, la cual es esencial para mitigar los efectos adversos sobre la salud pública y la biodiversidad. En este contexto, los residuos pueden presentarse en distintos estados de la materia—sólido, semisólido, líquido o gaseoso—y su impacto en el medio ambiente se manifiesta principalmente en la contaminación del suelo, el agua y el aire. Esta diversidad en la forma de los residuos hace aún más complejo su manejo y aumenta su capacidad para afectar diversos ecosistemas (Ortíz-Pecha *et al.*, 2020).

**Tabla 1.** Alcances de la economía circular

ÁREA DE ACCIÓN	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA
Restauración de productos	Implica la reparación, restauración o renovación de productos para prolongar su vida útil	Morocho, 2018.
Reutilización de materiales	Consiste en volver a usar productos o materiales sin realizar modificaciones significativas	Morocho, 2018.
Reciclaje	Transformación de materiales descartados en nuevos productos o materiales para reducir la necesidad de recursos vírgenes	Cartay <i>et al.</i> , 2023.
Diseño sostenible	Implica la creación de productos que sean fáciles de reparar, reutilizar o reciclar al final de su vida útil	Melo <i>et al.</i> , 2022.
Optimización de recursos	Busca mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, reduciendo el consumo de materiales y energía	Cartay <i>et al.</i> , 2023.
Modelos de negocio circulares	Se refiere a modelos que permiten la reutilización o el intercambio de productos, como el leasing o la reparación compartida	Tagle y Carrillo, 2022.
Economía de bajo desperdicio	Promueve la reducción del desperdicio a través de una mayor eficiencia en el uso de los recursos y la minimización de residuos	Melo <i>et al.</i> , 2022; Tagle y Carrillo, 2022.
Uso de energía renovable	La EC también fomenta el uso de fuentes de energía renovables para minimizar la huella de carbono	Espinoza, 2023.
Estrategias de extensión de vida	Implica crear estrategias y sistemas para alargar la vida útil de productos y reducir la necesidad de nuevos recursos	Melo <i>et al.</i> , 2022.

¿Sabes la diferencia entre desecho y residuo?

La diferencia entre "desecho" y "residuo" es clave para comprender cómo gestionamos los materiales que ya no tienen un uso inmediato en nuestras actividades diarias. Aunque a menudo se usan de manera intercambiable, estos términos tienen implicaciones distintas según su utilidad.

Desecho: Se refiere a aquello que ya no tiene utilidad o valor para su propietario, por lo que se considera inservible y, en consecuencia, se descarta (Ortíz-Pecha *et al.*, 2020).

Residuo: Según la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) (DOF, 2003), se define como "cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento, cuya calidad no permite su reutilización en el proceso que lo originó".

Sin embargo, estas definiciones pueden quedar cortas ya que actualmente los desechos son considerados como residuos. Por ejemplo, las heces fecales sirven como abonos, con restos de comida se pueden hacer compostas, con desechos orgánicos, agropecuarios, ganaderos e industriales se puede obtener biogás (que es un biocombustible) (Raza y Acosta 2022).

El Impacto Ambiental de los Residuos

Los residuos se han convertido en uno de los problemas ambientales más graves y complejos que debemos enfrentar, debido a su creciente volumen, acumulación descontrolada y diversidad de estos, no solo afectan el paisaje urbano y natural, sino que también contribuyen significativamente a la contaminación de los ecosistemas y facilita la propagación de enfermedades (Montilla y Sánchez, 2021).

La disposición inadecuada de residuos tiene efectos perjudiciales sobre el medio ambiente. Por ejemplo, los desechos sólidos urbanos mal gestionados pueden obstruir los sistemas de drenaje, provocando inundaciones y aumentando el riesgo de contaminación en los cuerpos de agua. Además, los residuos peligrosos, al entrar en contacto con la fauna y la flora, pueden ocasionar daños devastadores a la biodiversidad (Rodríguez y López, 2020).

Para abordar estos desafíos, los planes de manejo de residuos deben ser efectivos, y para ello es esencial contar con una clasificación adecuada. La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) en México establece esta clasificación, que incluye residuos peligrosos (RP), residuos de manejo especial (RME) y residuos sólidos urbanos (RSU). Esta categorización permite enfocar los esfuerzos en la valorización y reutilización de los desechos, lo cual contribuye a la reducción de la extracción de materias primas y a la conservación de los recursos naturales (Ortiz-Pecha *et al.*, 2020; Rodríguez y López, 2020).



Clasificación de los Residuos: Una Necesidad para su Manejo Eficaz

1. **Residuos Peligrosos (RP).** Son aquellos que presentan un riesgo significativo para la salud humana y el medio ambiente, debido a sus propiedades corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas. Estos incluyen sustancias químicas peligrosas y sus envases, y generalmente se generan en industrias y grandes empresas, aunque también pueden encontrarse en menor medida en los hogares. Su manejo debe ser extremadamente cuidadoso para evitar daños a los ecosistemas y la salud pública (SEMARNAT, 2020).
2. **Residuos de Manejo Especial (RME).** Aunque no representan una amenaza tan grave como los residuos peligrosos, estos materiales requieren un tratamiento especializado. Estos se generan en distintos procesos productivos, como en la industria, en el sector salud, agrícola y tecnológico (SEMARNAT, 2020).
3. **Residuos Sólidos Urbanos (RSU).** Según la fracción XXXIII del artículo 5° de la LGPGIR, los RSU son aquellos generados en hogares, comercios y espacios públicos, incluyendo materiales desechados de actividades domésticas, productos consumidos y sus envases, así como residuos de la limpieza de calles y áreas públicas con características domiciliarias (SEMARNAT, 2020).

Los RSU se clasifican en orgánicos e inorgánicos para facilitar su manejo (Castillo-Minjarez *et al.*, 2022).

- **Residuos Orgánicos:** Incluyen restos de alimentos, cáscaras de frutas y vegetales, yerba, servilletas de papel, huesos, grasa, entre otros. También abarcan los desechos generados en actividades de jardinería, como ramas y hojas secas. Este grupo de residuos se denomina fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos domiciliarios (FORSU) y es de gran importancia, ya que los desechos orgánicos pueden ser compostados, transformándolos en un recurso valioso para la agricultura o como fertilizante.
- **Residuos Inorgánicos:** Comprenden materiales reciclables como vidrio, plástico, metal y papel, los cuales pueden ser procesados y reincorporados a la cadena productiva (del Rosario y Schamber, 2024).

¿Qué es la Gestión Integral de Residuos?

La Gestión Integral de Residuos (GIR) son todos aquellos procesos, actividades y acciones indispensables para el manejo de los residuos. El objetivo principal de la gestión es minimizar el impacto ambiental y social que generan los residuos al no ser tratados adecuadamente.

La GIR, consta de diversas etapas: generación de residuos, separación y almacenamiento, recolección y transporte de residuos, tratamiento de residuos y disposición final. Cada una de estas etapas contribuye a que los residuos sean tratados adecuadamente y puedan ser incorporados en la EC (Pellegrino *et al.*, 2021).

Marco Normativo en México para la Gestión de Residuos

México cuenta con un marco normativo robusto para la gestión de residuos, que se orienta hacia un modelo más sostenible y alejado del tradicional tratamiento de la basura. Esta legislación se cimienta en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR), promulgada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en 2003 y reformada en 2006. La LGPGIR promueve la prevención, reducción, reutilización y reciclaje de residuos, con el objetivo de mitigar su impacto ambiental). A través de esta legislación, se busca evitar que los residuos sean simplemente depositados en vertederos sin un tratamiento adecuado, promoviendo su valorización y reducción (Bernache, 2024).

Sin embargo, la gestión de residuos no es un asunto exclusivo del ámbito federal. Cada entidad federativa en México tiene la facultad de definir cuáles residuos se consideran Residuos de Manejo Especial (RME), basándose en un diagnóstico local (Vargas, 2023). Esta autonomía permite a los gobiernos estatales y municipales adaptar sus estrategias a las necesidades específicas de sus regiones, promoviendo una gestión más eficiente y sostenible. Cada entidad puede ajustar la legislación a sus circunstancias particulares, lo que facilita una mejor gestión de residuos orgánicos y otros tipos (Manzanares y Martínez, 2022).

Este enfoque descentralizado, que consiste en repartir decisiones y responsabilidades desde una autoridad central hacia distintos grupos o lugares, es clave para enfrentar uno de los principales desafíos globales: el tratamiento eficiente y sostenible de los RSU (Suárez y Ramos, 2022). Al permitir que los gobiernos locales diseñen políticas adaptadas a sus realidades, más allá de las normativas federales, se facilita una gestión más flexible y ajustada a las características de cada región. Así, la



descentralización se convierte en una herramienta crucial para abordar de manera más eficaz los problemas relacionados con los residuos (Camaño, 2022).

A nivel mundial, diversos países están adoptando enfoques innovadores para transformar la gestión de residuos, enfocándose en valorizar los materiales reciclables y reducir los impactos ambientales. Estas estrategias buscan optimizar la eficiencia en el manejo de residuos y disminuir los efectos negativos de su disposición en vertederos o incineradoras.

En la Tabla 2, se presentan algunas de las iniciativas más destacadas que están revolucionando la gestión de residuos urbanos en todo el mundo, y que podrían servir de inspiración para desarrollar políticas locales en México.

Tabla 2. Estrategias Sostenibles en la Gestión de Residuos

ESTRATEGIA/ÁREA	DESCRIPCIÓN	OBJETIVO/BENEFICIO
Planta de separación de residuos	Instalación de plantas que clasifican los residuos en reciclables, orgánicos y no reciclables (Manzanares y Martínez, 2022).	Reducir el impacto ambiental y promover la valorización de residuos.
Optimización de rutas de recolección	Mejora de rutas para un uso eficiente de recursos, especialmente el combustible (Espinoza, 2023).	Ahorro de combustible y reducción de la huella de carbono.
Relleno sanitario con biogás	Diseño de rellenos sanitarios con captación de biogás y recirculación de lixiviados (Manzanares y Martínez, 2022).	Minimizar el impacto ambiental de la disposición final de residuos.
Reciclaje y EC en plásticos	Fomento del reciclaje y biodegradación controlada de plásticos, sustituyendo los derivados del petróleo por materiales renovables (Seguí et al., 2018).	Reducir la contaminación por plásticos y promover la EC.
Sistema de depósito de envases (Alemania)	Implementación del Sistema de Depósito, Devolución y Retorno (SDDR) para botellas, con una tasa de reciclaje del 97.2% (Žmak y Hartmann, 2017).	Aumentar la tasa de reciclaje y promover la reutilización de envases.
Gestión de residuos electrónicos (REE)	Mejora en la gestión de residuos electrónicos, enfocándose en el reciclaje de baterías de litio (Paniagua et al., 2020).	Recuperar materiales valiosos y evitar la contaminación.
Reciclaje de baterías de litio	Reciclaje de baterías de litio de vehículos eléctricos para recuperar metales reutilizables (Galindo, 2020).	Reducir la dependencia de la minería y promover la EC.
Economía circular en IKEA (empresa sueca)	IKEA diseña productos que pueden ser reutilizados, reparados o reciclados (Galindo, 2020).	Fomentar el reciclaje y la reutilización de productos durante todo su ciclo de vida.
Moda sostenible	Desarrollar estrategias sostenibles e innovadoras para el aprovechamiento de textiles (Fernández y Ramírez, 2023).	Reducir residuos textiles mediante el reciclaje y la reutilización de prendas.
Agricultura regenerativa y residuos orgánicos	Compostaje y rotación de cultivos para convertir residuos orgánicos en compost, biogás o alimento (Osorio y Zapata, 2023; Carmín y Quispe, 2021).	Mejorar la salud del suelo, reducir el uso de químicos y generar energía renovable.



Conclusiones

La economía circular (EC) emerge como una respuesta innovadora ante los crecientes problemas ambientales causados por la sobreexplotación de recursos y la acumulación de residuos. A diferencia del modelo económico tradicional, que sigue un patrón de "tomar, hacer, desechar", la EC promueve un ciclo cerrado en el que los productos y materiales se reutilizan, reparan y reciclan, lo que reduce el impacto ambiental y maximiza el uso de los recursos.

Aunque algunas empresas han adoptado la EC, su incorporación en las políticas públicas sigue siendo insuficiente. La falta de una implementación rigurosa de los marcos regulatorios sólidos, la escasa educación ambiental desde el entorno familiar y la limitada integración de la EC en las agendas gubernamentales restringen su impacto. Para lograr una transición exitosa, es crucial un compromiso conjunto entre los sectores público y privado, así como un cambio profundo en las prácticas industriales y hábitos de consumo.

La gestión adecuada de los residuos es un pilar fundamental de la EC. Procesos como la valorización de residuos, la conversión de desechos orgánicos en compost o biogás, y la reutilización de plásticos no solo ayudan a reducir la contaminación, sino que también permiten recuperar recursos valiosos para otros ciclos productivos. Sin embargo, para que estas prácticas sean efectivas a gran escala, es crucial desarrollar políticas públicas que impulsen la adopción de tecnologías innovadoras y promuevan prácticas sostenibles en todos los sectores.

A nivel global, diversas iniciativas muestran que integrar los principios de la EC en todos los niveles de producción y consumo puede reducir significativamente el impacto ambiental. Aunque la implementación a gran escala de la EC presenta desafíos, los ejemplos actuales muestran que la transición hacia un modelo económico más sostenible es completamente alcanzable.

Perspectivas y consideraciones

1. **Necesidad de políticas públicas más fuertes:** Es crucial integrar la economía circular en las políticas públicas y fortalecer los marcos regulatorios para que su impacto sea real y sostenible.
2. **Educación y concientización ambiental:** Se debe promover la educación sobre el reciclaje y la reducción de residuos, tanto en la población como en las empresas, para lograr un cambio cultural.
3. **Mejorar la clasificación de residuos:** Separar adecuadamente los residuos facilita su reciclaje y valorización, lo que reduce la contaminación y mejora la eficiencia en su gestión.
4. **Descentralización para soluciones locales:** Permitir que los gobiernos locales diseñen políticas adaptadas a sus realidades mejora la gestión de residuos y permite respuestas más eficaces.
5. **Inspiración de modelos internacionales:** Las experiencias de otros países pueden servir como guía para desarrollar políticas locales de gestión de residuos en México, adaptándolas a sus contextos específicos.
6. **Beneficios económicos de la valorización de residuos:** Transformar residuos en nuevos recursos no solo mejora el ambiente, sino que también puede generar nuevas oportunidades económicas y empleo.

Agradecimientos

El primer autor agradece al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECyT) por la beca otorgada para realizar la estancia de investigación en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx) a través del Programa Investigadoras e Investigadores COMECyT, promoción 2024.

Referencias

Barragán, M. Y. C., y M. I. Barragán. 2017. Economía circular y desarrollo sostenible: Retos y oportunidades de la Ingeniería Ambiental. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Comercial. Universidad Estatal de Milagro, Milagro, Ecuador. 21.



- Bernache, G. 2024. Residuos y ambiente. El riesgo de contaminación del agua por la disposición de basura urbana. *Estudios De La Ciénega*, (8): 117-132. Recuperado a partir de <http://revistaestudiosdelacienega.com/ojs/index.php/rec/article/view/124>
- Camaño, E. S. 2022. Caracterización de los residuos sólidos urbanos en Tepoztlán, Morelos, para el diseño de un sistema de manejo sustentable. Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables. Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. 61. URI: <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/2822>
- Carmín, S. A., y C. W. Quispe 2021. Revisión sistemática: impactos ambientales generados por desperdicio de alimentos. *Ingeniero Ambiental*. Universidad César Vallejo. Lima-Perú. 52.
- Cartay, R., J.C.O. Piedra, J.R.I. Valarezo y A. Varela. 2023. Estrategias para la reducción de los residuos agrícolas sólidos potencialmente contaminantes desde una perspectiva de sostenibilidad ambiental. *Revista agroalimentaria* 29(57): 43-67.
- Castillo-Minjarez, J.M., E. A. Vargas-León, P. López-Ordaz, A. Angel-Cuapio y F. J. Martínez-Valdez. 2022. Implementación de tratamientos biológicos en la disminución de residuos sólidos urbanos. Universidad Tecnológica de Tecámac, División de Electromecánica Industrial y División Químico Biológicas. C.P. 55740, Estado de México, México y AAC BIOLAB, Laboratorio de Investigación, Norte 8 #214, Santa Cruz, C.P. 56617, Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México, México. *Mexican Journal of Technology and Engineering* 2(1).
- Cosavalente, C. M. J., y J. M. Gonzales. 2022. Evaluación del impacto de la economía circular en la gestión sostenible de los residuos sólidos. Universidad César Vallejo. Obtenido de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/100354/Cosavalente_CMJ-Gonzales_PJM-SD.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- del Rosario Moreno, I. y P. J. Schamber. 2024. La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en Argentina. Normativas que condicionan su tratamiento y experiencias que proyectan potencialidades en la región metropolitana de Buenos Aires. *Cuaderno Urbano* 38(38): 135-155.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2003. Ley General para la prevención y gestión integral de los residuos. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Publicación Oficial. [en línea]. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf>
- Espinoza, A. 2023. Economía circular: una aproximación a su origen, evolución e importancia como modelo de desarrollo sostenible. *Revista de economía institucional* 25(49): 109-134.

- Fernández, L. T. M. y A.T.O. Ramírez. 2023. Estrategias sostenibles para el aprovechamiento de textiles provenientes de la moda rápida (fast fashion). *Revista EIA* 20(40): 4003.
- Fraire, M., M. B. Moine, M. V. Tamagno y S. Peralta. 2023. De la economía lineal a la economía circular: Caracterización y beneficios del modelo circular. *Paralelismo con el modelo lineal. Territorios Productivos*, (1).
- Galindo, D. S. 2020. Economía circular: de alternativa a necesidad. *Desarrollo y Territorio*, (8):112-117.
- Graziani, P. 2018. Economía circular e innovación tecnológica en residuos sólidos: Oportunidades en América Latina. Books. CAF Development Bank Of Latinamerica.1247.
- Manzanares, M. M. E. y D. Martínez. 2022. Propuesta de manejo integral de residuos sólidos urbanos en los municipios de Acolman, San Martín de las Pirámides y Teotihuacán del Estado de México. *Licenciatura en Biotecnología. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México*. 103.
- Marcet, M. y F. Vergés. 2018. Qué es la economía circular y por qué es importante para el territorio Xavier Marcet. *Asociación Pacto Industrial de la Región Metropolitana de Barcelona*, (4).
- Melendez, J. R., J. L. Delgado, V. Chero y J.F. Rodríguez. 2021. Economía Circular: Una Revisión desde los Modelos de Negocios y la Responsabilidad Social Empresarial. *Revista Venezolana de Gerencia: RVG* 26(6):560-573.
- Melo, C.D., G. Castillo y L. J. C. García. 2022. De la economía lineal a la economía circular, transformaciones en el manejo de los residuos sólidos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* 6(4): 52-82.
- Montilla P. L. y D. K. Sánchez. 2021. Procesos gubernamentales que contribuyen a la gestión de residuos sólidos: una necesidad en la provincia de San Martín 2020. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* 5(4): 6149-6183. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i4.765
- Morocho, F. R. A. 2018. La economía circular como factor de desarrollo sustentable del sector productivo. *INNOVA Research Journal* 3(12):78-98.
- Mulder, N. y M. Albaladejo. 2020. El comercio internacional y la economía circular en América Latina y el Caribe. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Recuperado de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/46618-comercio-internacional-la-economia-circular-america-latina-caribe>



- Muñoz, S., M. R. Hosseini y R. H. Crawford. 2024. Towards a holistic assessment of circular economy strategies: The 9R circularity index. *Sustainable Production and Consumption* 47:400-412.
- Ortiz-Pecha, R., L. C. Burgos-Suárez y A. R. Rivera-de la Rosa. 2020. Generación, reciclaje y disposición final de los principales residuos en México, 2000-2014. *Gestión y Ambiente* 23(1): 73-87.
- Osorio, N. y S. Zapata. 2023. Economía circular en el Valle de Aburrá: una propuesta alternativa de sistema alimentario. Maestría en Sostenibilidad. Universidad Pontificia Bolivariana. Colombia. 87.
- Paniagua, D. K. B., A.H. Granados, E.B.D. Cruz, K.G.C. Villavicencio y H.M. Valencia. 2020. Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE): Impacto social, ambiental, gestión y metodologías sobre su manejo. *ENERLAC. Revista de energía de Latinoamérica y el Caribe* 4(2): 108-131.
- Pellegrino, L. A., L. J. Chiozzi, A. B. Pinatti y V. I. Ramírez. 2021. Riesgos de la gestión ambientalmente inadecuada de RAEE. Definición y pasos para un tratamiento sustentable. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research* 3 (4): 4783-4796.
- Raza, C.D. y J. Acosta. 2022. Planificación ambiental y el reciclaje de desechos sólidos urbanos. *Economía, sociedad y territorio* 22(69): 519-544.
- Rodríguez, A. V. y M. G. C. López. 2020. Basura Cero. Gestión de residuos sólidos urbanos en México. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Sociales y Humanísticas: RICSH* 9(18): 130-150.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2006. Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Secretaría de Medio Ambiente Recursos y Recursos Naturales, Cámara de Diputados [en línea]. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGPGIR_311014.pdf. 20/01/15.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2020. Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Ciudad de México: SEMARNAT. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>
- Seguí, L., R. Medina y H. Guerrero. 2018. Gestión de residuos y economía circular. *EAE Business School*. 1-46.

- Suárez-Durand, M.G. y M. H. Ramos. 2022. La descentralización y la competitividad. *Gobierno y Gestión Pública* 2(9).
- Tagle, D. Z., y G. Carrillo. 2022. Gestión de residuos sólidos en León, Guanajuato: indicios de economía circular y de los objetivos del desarrollo sostenible. *Región y sociedad*.34.
- Vargas, C. D. C. 2023. La economía circular como mecanismo de reducción del impacto ambiental por los residuos sólidos urbanos, caso de estudio: zona metropolitana de la Ciudad de México. Maestría en Ciencias en Arquitectura y Urbanismo. Instituto Politécnico Nacional. México. 175.
- Wandurraga, L. A. A. 2020. Economía circular: una alternativa para la planeación ambiental y preservación de los recursos naturales. (Especialización de en planeación ambiental y manejo de recursos naturales). Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, 2020. Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/37295/Wandurraga>
- Žmak, I., y C. Hartmann. 2017. Current state of the plastic waste recycling system in the European Union and in Germany. *Technical Journal*, 11(3):138–142.

Cita

Ortiz Velazquez S., I. Cervantes-Zepeda, D. García-Mondragón, I. Gallego-Alarcón, G. González-Blanco. Economía circular: Respuesta a la crisis de manejo de residuos. *Recursos Naturales y Sociedad*, 2025. Vol. 11 (1): 198-214. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0013>

Sometido: 30 de diciembre de 2024

Aceptado: 30 de abril de 2025

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

**Sleeping while flying:
a unique strategy and its implications for seabird conservation**

Dormir volando: una estrategia única y sus implicaciones para la conservación de aves marinas

María Ariadna Pérez Hernández^{1*}, Cecilia Soldatini², Yuri V. Albores-Barajas^{1,3}

Resumen

El sueño unihemisférico, una fascinante adaptación evolutiva, permite a algunas especies realizar dos funciones simultáneamente: dormir mientras migran largas distancias y mantenerse alerta frente a posibles depredadores. En este artículo exploramos las características de este mecanismo, con especial énfasis en las aves marinas, y discutimos cómo estas estrategias influyen en su conservación. Además, resaltamos la importancia de los periodos de descanso en tierra para la recuperación de estas aves tras sus vuelos prolongados.

Palabras clave

Sueño unihemisférico, sueño unihemisférico de onda lenta (USWS), sueño de onda lenta (SWS), sueño con movimientos oculares rápidos (REM).

¹ Universidad Autónoma de Baja California Sur. Blvd. Forjadores s/n. La Paz, C.P. 23080, México.

² Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
Unidad Académica La Paz, Miraflores 334, La Paz, Baja California Sur 23050, México.

³ SECIHTI. Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación.
Av. Insurgentes Sur 1582, Mexico City, C.P. 03940, México.

* Autor de correspondencia: E-mail: mariaariap_22@alu.uabcs.mx



Abstract

Unihemispheric sleep, a fascinating evolutionary adaptation, allows some species to perform two functions simultaneously: sleeping while migrating long distances and staying alert to potential predators. In this article, we explore the characteristics of this mechanism with a special focus on seabirds. We also discuss how these strategies impact their conservation. Additionally, we highlight the importance of land rest periods for the recovery of these birds after their extended flights.

Keywords

Unihemispheric sleep, Unihemispheric Slow Wave Sleep (USWS), Slow Wave Sleep (SWS), Slow Wave Sleep or Rapid Eye Movement (REM).

Antecedentes

Cuando imaginamos a los animales durmiendo, es común visualizarlos inmóviles, en un lugar seguro. Sin embargo, la naturaleza nunca deja de sorprendernos. Algunas aves marinas han desarrollado la capacidad de dormir mientras vuelan, una hazaña impresionante que combina descanso y supervivencia. Éste fenómeno se conoce como "sueño unihemisférico", un estado en el que un hemisferio del cerebro permanece despierto mientras el otro descansa (Rattenborg *et al.*, 2000). Esta habilidad no solo les permite ahorrar energía y mantenerse en movimiento, sino también estar alertas ante posibles amenazas en un entorno hostil. La idea de combinar descanso y vigilia en pleno vuelo desafía nuestra comprensión tradicional del sueño y plantea nuevas preguntas sobre los límites de la adaptación animal. ¿Qué procesos fisiológicos hacen posible este estado? ¿Qué ventajas les ofrece frente a otras especies? Estas interrogantes son clave para desentrañar la relación entre el sueño y la supervivencia en aves marinas.

El fenómeno del sueño unihemisférico nos muestra cómo algunas especies han desarrollado soluciones únicas a los desafíos impuestos por su entorno. A lo largo de este artículo exploraremos en detalle las características de este mecanismo, sus implicaciones ecológicas y cómo los estudios recientes están arrojando luz sobre su importancia para la conservación de las aves marinas. Entender esta capacidad no solo nos ayuda a conocer mejor a estas especies, sino que también nos permite reflexionar sobre cómo los animales han evolucionado para adaptarse a condiciones extremas.

El sueño unihemisférico: una herramienta para la supervivencia

El sueño cumple funciones esenciales para los animales, como la consolidación de la memoria, la reparación celular y la recuperación física (Stickgold *et al.*, 2000; Hennevin *et al.*, 1995). En las aves, el sueño se divide en dos tipos principalmente: el primero es el sueño de ondas lentas (Slow-Wave Sleep, SWS, por sus siglas en inglés), caracterizado por una actividad cerebral lenta y sincronizada que promueve la restauración física. El segundo tipo es el sueño con movimientos oculares rápidos (Rapid Eye Movement, REM, por sus siglas en inglés), asociado a funciones cognitivas complejas, como el procesamiento de información y la consolidación de la memoria (Amlaner y Ball, 1994). Sin embargo, lo que distingue a algunas aves marinas es su capacidad para alternar entre estas fases del sueño y adoptar un estado de "sueño parcial" conocido como sueño unihemisférico de ondas lentas (Unihemispheric Slow-Wave Sleep, USWS, por sus siglas en inglés). Este estado permite que un hemisferio del cerebro descansa mientras el otro permanece activo y alerta, facilitando una vigilancia continua del entorno (Rattenborg *et al.*, 1999a).

El USWS es especialmente útil en situaciones donde detenerse es imposible o peligroso, como durante extensas migraciones transoceánicas. Estudios han mostrado que especies como las fragatas pueden pasar semanas en el aire, aprovechando las corrientes térmicas para planear y descansar de manera intermitente (Rattenborg *et al.*, 2016). Durante este tiempo, el hemisferio "despierto" supervisa la posición del ave en el grupo y detecta posibles amenazas, como depredadores o colisiones. Además, este mecanismo permite a las aves ajustar su trayectoria de vuelo y optimizar su consumo de energía, asegurando así su supervivencia en ambientes extremos.

El sueño unihemisférico también plantea interrogantes fascinantes sobre la distribución de funciones entre los hemisferios cerebrales de las aves. Se ha observado que los hemisferios cerebrales de muchas especies están especializados para funciones específicas; por ejemplo, un hemisferio puede ser más eficiente en la vigilancia del entorno, mientras que el otro gestiona tareas de navegación (Vallortigara, 2000). Esta especialización podría explicar por qué las aves son capaces de mantener un equilibrio entre descanso y funcionalidad durante periodos prolongados. Aunque aún queda mucho por descubrir, la investigación sobre el sueño unihemisférico ofrece una ventana única para comprender los límites de la adaptación biológica.



Dormir volando: el arte de equilibrar descanso y movimiento

El sueño en vuelo plantea fascinantes desafíos y ventajas, especialmente para especies que enfrentan largas migraciones sobre océanos abiertos. Retomando el ejemplo de las fragatas, estas icónicas aves marinas deben mantenerse en vuelo durante semanas, ya que su plumaje no es impermeable y les impide descansar en el agua. Para conservar energía, reducen su sueño a unos pocos minutos al día mientras se elevan aprovechando las corrientes térmicas (Rattenborg *et al.*, 2016). Estas siestas breves, conocidas como "sueños parciales", les permiten cumplir con las necesidades mínimas de descanso sin comprometer su capacidad de vuelo. Sin embargo, la falta de sueño acumulada durante estos viajes tiene un costo. Las aves suelen llegar a tierra agotadas y deben dedicar períodos prolongados a la recuperación del sueño REM, que es esencial para restaurar funciones cognitivas y físicas (Tisdale *et al.*, 2018).

Una de las características más intrigantes del sueño en vuelo es cómo las aves equilibran la necesidad de descansar con las demandas de la navegación y la vigilancia. Durante los vuelos en parvada, por ejemplo, el sueño unihemisférico les permite monitorear su posición relativa al grupo y mantener la cohesión, reduciendo el riesgo de separación o colisión (Ball *et al.*, 1988). Además, este estado de sueño parcial les ayuda a ajustar su trayectoria en respuesta a cambios en las condiciones climáticas o la disponibilidad de corrientes ascendentes (Lima, 1998).

El estudio del sueño en vuelo también ha revelado paralelismos con otros animales, como los delfines, que emplean estrategias similares para descansar mientras nadan en grupo (Black, 2009; Goley, 1999). Estas comparaciones sugieren que el sueño unihemisférico es una solución evolutiva recurrente en especies que enfrentan desafíos similares. Sin embargo, aún quedan muchas preguntas por responder: ¿Cómo afecta la pérdida de sueño prolongada a la salud a largo plazo de estas aves? ¿Qué factores determinan cuánto tiempo pueden sostener esta estrategia sin consecuencias graves? Responder a estas preguntas no solo ampliará nuestro conocimiento sobre la fisiología del sueño, sino que también podría ofrecer pistas valiosas para la conservación de las especies migratorias.

Implicaciones para la conservación

Las aves marinas no solo están expuestas a demandas ambientales, sino también a contaminación y perturbaciones del ambiente causadas por los humanos, las cuales pueden generar diversas alteraciones en sus comportamientos o ciclos de vida. Por ejemplo, la contaminación acústica generada por los desarrollos costeros, la industria marina, el turismo y las actividades recreativas, puede estresarlos y reducir el tiempo que dedican a realizar comportamientos biológicamente importantes, como la búsqueda de alimento, la comunicación, la reproducción y el sueño (Lasiello y Colombelli-Négrel, 2023).

Otro tipo de contaminación es la lumínica, causada por las luces artificiales que alteran los niveles de luz naturales durante la noche. Se ha observado que esta puede generar desorientación en los polluelos de aves marinas que se dirigen hacia el mar por primera vez en su vida, causando que choquen con construcciones o vehículos, así como volviéndolos presa fácil de otros animales (Rodríguez *et al.*, 2015). Estas mismas luces artificiales pueden interrumpir o alterar los ciclos de sueño, como se ha observado en otras aves (Raap *et al.*, 2015).

El estudio del sueño unihemisférico no solo nos ayuda a comprender mejor el comportamiento de las aves marinas, sino que también tiene implicaciones directas para su conservación. Por ejemplo, identificar áreas clave donde las aves descansan después de largos vuelos podría ser esencial para establecer zonas protegidas (Bednekoff y Ritter, 1994). Además, investigar cómo las perturbaciones humanas, como el ruido y las luces artificiales, afectan sus patrones de sueño podría arrojar luz sobre medidas para mitigar estos impactos (Elgar, 1989). Algunas de estas medidas podrían ser el desarrollo de legislaciones para preservar el cielo nocturno natural y la reducción del ruido para resguardar a la vida silvestre, sobre todo en áreas naturales protegidas.



Perspectivas y consideraciones

El sueño unihemisférico es una muestra más de la increíble capacidad de adaptación de las aves marinas. Sin embargo, aún queda mucho por aprender sobre cómo este fenómeno influye en su comportamiento y supervivencia. Conservar estas especies requiere no solo proteger sus hábitats, sino también comprender las estrategias únicas que emplean para enfrentar los desafíos de su entorno. Al seguir estudiando este fascinante tema, no solo descubrimos más sobre las aves marinas, sino que también obtenemos pistas sobre cómo los animales, incluyendo a los humanos, pueden adaptarse a las demandas de un mundo en constante cambio.

Referencias

- Amlaner, C. J. y N. Ball. 1994. Avian Sleep pp. 81-94. En: Kryger, M., T. Roth y W. C. Dement (Eds). Principles and Practice of Sleep Medicine. W.B. Saunders Company. Philadelphia, USA. 739 pp.
- Ball, N., C. J. Amlaner, J. P. Shaffery y M. R. Opp. 1988. Asynchronous Eye-Closure and unihemispheric quiet sleep of birds. Gustav Fischer. New York. 153 pp.
- Bednekoff, P. A. y R. Ritter. 1994. Vigilance in Ngal Pan Springbok, *Antidorcas Marsupialis*. Behaviour 129 (1-2): 1-11.
- Black, N. A. 2009. Pacific White-Sided Dolphin: *Lagenorhynchus obliquidens*. pp. 817-819. En: Perri, W. F., B. Würsig y J.G.M. Thewissen (Eds). Encyclopedia of Marine Mammals. Academic Press. California, USA. 1355 pp.
- Elgar, M. A. 1989. Predator vigilance and groups size in mammals and birds: a critical review of the empirical evidence. Biological Reviews 64 (1): 13-33.
- Goley, P. D. 1999. Behavioral aspects of sleep in Pacific White-Sided Dolphins (*Lagenorhynchus Obliquidens*, Gill 1865) 1. Marine Mammal Science 15(4): 1054-1064.
- Hennevin E., B. Hars, C. Maho y V. Bloch. 1995. Processing of learned information in paradoxical sleep: relevance for memory. Behavioural Brain Research 69(1-2): 125-135.
- Lasiello, L. y D. Colombelli-Négrel. 2023. Noisy neighbours: effects of construction noises on nesting seabirds. Marine and Freshwater Research. 74 (7): 573-585.

- Lima, S. L. 1998. Stress and decision-making under the risk of predation recent developments from behavioral, reproductive, and ecological perspectives. *Advance in the Study Behavior* (27): 215-290.
- Raap, T., R. Pinxten y M. Eens. 2015. Light pollution distrupts sleep in free-living animals. *Scientific Reports*. 13557 (5): 1-8.
- Rattenborg, N. C., S. L. Lima y C. J. Amlaner. 1999. Facultative control of avian unihemispheric sleep under the risk of predation. *Behavioural Brain Research* 105 (2): 163-172.
- Rattenborg, N. C., S. L. Lima y C. J. Amlaner. 2000. Behaivorial, neurophysiological and evolutionary perspectives on unihemispheric sleep. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. 24 (8): 817-842.
- Rattenborg, N. C., B. Voirin, S. Cruz, R. K. Tisdale, G. Dell’Omo, H. Lipp, M. Wikelski y A. L. Vyssotski. 2016. Evidence that birds sleep in mid-flight. *Nature Communications* 7 (1): 1-9.
- Rattenborg, N. C. 2017. Sleeping on the wing. *Interface Focus* 1 (7): 1-14.
- Stickgold, R., D. Whidbee, B. Schirmer, V. Patel y J. A. Hobson. 2000. Visual discrimination task improvement: a multi-step process occurring during sleep. *Journal Of Cognitive Neuroscience* 12 (2): 246-254.
- Rodriguez A., D. García, B. Rodríguez, E. Cardona, L. Parpal y P. Pons. 2015. Artificial lights and seabirds: is light pollution a threat for the threatened Balearic petrels?. *Journal of Ornithology*. 156 (4): 893-902.
- Tisdale, R. K., J. A. Lesku, G. J. L. Beckers. A. L. Vyssotski y N. C. Rattenborg. 2018. The low-down on sleeping down low: pigeons shift to lighter forms of sleep when sleeping near the ground. *Journal Of Experimental Biology* 221(19): 246-254.
- Vallortigara, G. 2000. Comparative neuropsychology of the dual brain: A stroll through animals’ left and right perceptual worlds. *Brain and Language* 73(2): 189-219



Créditos de imagen: Niels Rattenborg 2017

Resumen curricular de autores:

- María Ariadna Pérez Hernández. mariaariap_22@alu.uabcs.mx
Estudiante de la carrera de Biólogo Marino (séptimo semestre), Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS). Departamento de Ciencias Marinas y Costeras. Pasante de la Dr. Cecilia Soldatini.
- Dr. Cecilia Soldatini. csoldatini@cicese.mx
Investigadora Titular C en el CICESE Unidad La Paz, líder del Laboratorio de Aeroecología Marina, del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada). Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, actualmente Nivel I.
- Dr. Yuri V. Albores-Barajas. y.albores@uabcs.mx
Investigador por México SECIHTI adscrito a la Universidad Autónoma de Baja California Sur, en La Paz, donde imparte los cursos de Etología y Ornitología. Cuenta con mas de 40 publicaciones científicas en revistas indexadas y con factor de impacto. Dirige 4 estudiantes de posgrado y 7 de licenciatura.

Cita

Pérez Hernández M.A., C. Soldatini y Y. V. Albores-Barajas. Dormir volando: una estrategia única y sus implicaciones para la conservación de aves marinas, 2025. Vol. 11 (1): 216-224. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0014>

Sometido: 07 de febrero de 2025

Aceptado: 30 de abril de 2025

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editor asociado: Dr. Rubén Ortega Álvarez

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrasco

**One Health Approach at the Northwest Biological Research Center
(CIBNOR), S.C. Proceedings of the First One Health Forum:
Dialogue, Debate, and Awareness**

**Enfoque de Una Salud en el Centro de
Investigaciones Biológicas del Noroeste
(CIBNOR), S. C. Memorias del Primer Foro
Una Salud: Diálogos, Debate y Conciencia**

Carlos Angulo^{1*}, Ilie S. Racotta¹, Salvador E. Lluch-Cota¹, Elizabeth Monreal-Escalante¹, Daniela A. Murillo-Cisneros¹, Cinthya Castro¹ y Tania Zenteno-Savín^{1*}

Resumen

En el marco del 49 aniversario del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), S.C. el 25 de octubre del 2024 se llevó a cabo el Primer Foro Una Salud: Diálogos, Debate y Conciencia. El objetivo de este foro fue intercambiar reflexiones sobre la implementación del enfoque de Una Salud en los proyectos de investigación y en la oferta de programas de posgrado en el CIBNOR bajo el contexto actual a nivel institucional, nacional e internacional. Desde su instrumento jurídico de creación, el CIBNOR fue visionario al incorporar el estudio de aspectos socioeconómicos relacionados con el uso, manejo y preservación de los recursos naturales. Esta concepción primigenia pudiese considerarse como el ahora evolucionado concepto del enfoque de Una Salud. Desde el 2015, ya con el nombre Una Salud, investigadores y técnicos del CIBNOR han liderado algunos esfuerzos en México, según los registros históricos de proyectos, estudiantes, artículos, eventos académicos, y actividades de divulgación. Probablemente, los hitos institucionales más sobresalientes han ocurrido en los últimos 5 años, con la creación de Líneas Estratégicas de Investigación con el nombre Una Salud, un Laboratorio Nacional alineado a esta iniciativa, este Foro, entre otros. A 10 años de esta iniciativa, y a 50 años de vida del Centro, este documento comparte las experiencias y conocimientos sobre Una Salud de académicos que participaron en el Foro.

¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096 – México

* Autores de correspondencia: eangulo@cibnor.mx (612) 123-8501, tzenteno04@cibnor.mx (612) 123-8502

Está dirigido a toda la sociedad mexicana interesada, y en especial a la comunidad del CIBNOR, con el propósito de ir consolidando una opción para hacer investigación científica y formar recursos humanos que pueda ayudar a resolver problemas complejos que persisten y se relacionan con la preservación, manejo y aprovechamiento de los recursos naturales.

Palabras clave

Conservación del hábitat; desarrollo sustentable; bienestar; salud animal, humana, vegetal y ecosistémica.

Antecedentes

El Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), S.C., adscrito a la Coordinación Medio Ambiente, Salud y Alimentación del Sistema de Centros Públicos de Investigación (CPI) de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI, antes Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología, CONAHCYT) (Gobierno de México, 2025), tiene como misión “Contribuir con responsabilidad social para llevar a México a su máximo potencial mediante la generación y divulgación de conocimiento de frontera, la innovación y la formación de científicos y expertos en el campo de las ciencias biológicas y en el uso, manejo y preservación de los recursos naturales” (CIBNOR, 2022). Para el cumplimiento de su misión, sus objetivos prioritarios se orientan a realizar investigación de frontera y divulgarla, formar recursos humanos, vincularse con los sectores de la sociedad, y desarrollar soluciones y aplicaciones tecnológicas para resolver problemas socioambientales que contribuyan al desarrollo sustentable de las comunidades, el mercado y el gobierno de la región noroeste de México. En este contexto, la iniciativa mundial Una Salud (WHO, 2025) se presenta como una posible alternativa complementaria dentro del ámbito de acción del CIBNOR. A continuación, expondremos las razones que nos llevan a esta conclusión.

Definiciones

En el siglo XIX, se reconoció que muchas enfermedades son causadas por microorganismos, que hay enfermedades que se transmiten por contacto, y que muchas de estas enfermedades pueden prevenirse con medidas básicas de higiene, como el lavado de manos. A partir de este conocimiento, surgió la epidemiología y la visión de la Organización Mundial de la Salud (OMS) de salud pública como "la ciencia y el arte de prevenir enfermedades, prolongar la vida y fomentar la salud a través de esfuerzos organizados de la sociedad" (OMS, 2025).

Ya durante el siglo pasado, a muchos de nosotros nos enseñaron que salud se definía como "la ausencia de enfermedad". Sin embargo, esta concepción, simplista y reduccionista, ha quedado rebasada gracias al avance de los conceptos durante las últimas décadas. Por ello, y después de una serie de análisis y consideraciones sobre los factores que contribuyen al bienestar integral, la OMS amplió la definición de salud a "el estado de completo bienestar físico, mental y social" (OPS, 2024).

En este contexto, la alianza cuatripartita conformada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA, originariamente OIE) y la OMS definen Una Salud como "un enfoque unificador integrado que procura equilibrar y optimizar de manera sostenible la salud de las personas, los animales y los ecosistemas. El enfoque reconoce que la salud de las personas, los animales domésticos y silvestres, las plantas, y el ambiente en general (incluidos los ecosistemas) están estrechamente relacionados y son interdependientes" (FAO, 2025).

Reseña histórica

En una breve revisión histórica sobre el término Una Salud, encontramos antecedentes significativos que documentan los esfuerzos desde distintas disciplinas para concebir y asumir una perspectiva integradora de la salud. Autores como Zunino (2018) afirman que Hipócrates (460-370 a.C.) hablaba del ambiente, el clima y su relación con la presencia de enfermedades infecciosas, atribuyéndolas a algunos patrones de acuerdo con las estaciones del clima. Siglos después, Bourgelat, según refiere Zunino (2018), consolidó la educación formal en salud animal y prestó particular atención a sus interacciones con la salud humana. En la era moderna, es hasta la década de los 1970s que

Schwabe (1984) introduce el concepto de Una Medicina, proponiendo en ello integrar la medicina humana y veterinaria. En el 2004, en una conferencia organizada por la Wildlife Conservation Society en la ciudad de Nueva York, Estados Unidos, se presentó la frase One World, One Health como un enfoque para prevenir y responder a enfermedades emergentes (One World, One Health, 2004). Finalmente, el término Una Salud fue adoptado y popularizado, especialmente a partir de los brotes de enfermedades zoonóticas, como la gripe aviar (H5N1) y el virus del síndrome respiratorio agudo severo (SARS), que resaltaron la necesidad de una colaboración interdisciplinaria para abordar los problemas de salud que cruzan fronteras entre especies y ecosistemas. Bajo el enfoque Una Salud, organismos como la OMS, la OMSA, la FAO y el PNUMA, entre otras, promueven actualmente el manejo de la salud global de manera integrada, sobre todo con la aparición de nuevas amenazas pandémicas, como la enfermedad COVID-19 causada por el coronavirus SARS-CoV-2 (OMS, 2023).

En esencia, el concepto de Una Salud puede identificarse en la vocación del CIBNOR desde su nacimiento, plasmada en su Acta Constitutiva. En este instrumento jurídico de creación se establece que su primer objeto será realizar actividades de investigación científica y tecnológica básica y aplicada orientadas a la solución de problemas relacionados con el uso y manejo de los recursos naturales, para promover el desarrollo sustentable a nivel local, regional y nacional y en su caso, elaborar los estudios socio-económicos que los fundamenten (CIBNOR, 2021). Los estudios socio-económicos elaborados por el CIBNOR han sido fundamentales para conocer y recomendar acciones que favorecen la salud y el bienestar de las personas. El Acta también establece que el objeto del CIBNOR será contribuir al conocimiento de los recursos naturales, así como del efecto producido por variables naturales y antropogénicas sobre los mismos. Esta vocación puede ser constatada en la temática y alcances de los numerosos proyectos, informes técnicos, artículos científicos y libros producidos por el personal académico del Centro, así como en el perfil de los profesionistas de posgrado de la institución, donde puede encontrarse evidencia del estudio de las interrelaciones de la naturaleza y las personas, tanto como de los impactos de ésta sobre la salud ambiental, animal y del propio ser humano.

Quizá el primer proyecto donde se adoptó explícitamente el enfoque de Una Salud en CIBNOR se desarrolló hace una década, en 2014, y se trató de un proyecto de infraestructura financiado por el entonces CONAHCYT bajo el título “Fortalecimiento de la infraestructura de investigación y desarrollo de biotecnología enfocada hacia Una Sola Salud: Interfaz Animal-Hombre-Ecosistema” (proyecto número 225924, CONAHCYT-México: INFR-2014-01). A este proyecto se suman, en el 2017, la Conferencia sobre Una Salud en Las Américas organizada en colaboración entre el Instituto de Una Salud de la Universidad Estatal de Colorado (CSU) (Zenteno-Savín *et al.* 2017); en el 2019, el

Primer Simposio Nacional en Salud Humana, Animal, Vegetal y Ambiental (Una Salud) organizado por miembros del Programa de Agricultura en Zonas Áridas (PAZA) del CIBNOR (Angulo *et al.* 2019); y en el 2020, el proyecto financiado por CONAHCYT bajo el título “Segundo Simposio Nacional sobre salud humana, animal, vegetal y ambiental” (proyecto número 311555, CONAHCYT-México: F0003-2020-02). Posiblemente uno de los logros más relevantes es la integración, desde el 2023, del Laboratorio Nacional CONAHCYT de Generación de Vacunas Veterinarias y Servicios de Diagnóstico (LNC-GVD), en el que se desarrollan actividades utilizando el enfoque Una Salud.

Recientemente, en el marco del 49 aniversario del CIBNOR, el 25 de octubre del 2024 se llevó a cabo el Primer Foro Una Salud: Diálogos, Debate y Conciencia. El objetivo de este foro fue intercambiar reflexiones sobre la implementación del enfoque de Una Salud en los proyectos de investigación y en la oferta de programas de posgrado en CIBNOR bajo el contexto actual a nivel institucional, nacional e internacional. Durante este foro se presentaron visiones sobre la inserción de los temas de investigación en cada uno de los cuatro Programas Académicos del CIBNOR en el enfoque de Una Salud, sobre la percepción del futuro de Una Salud en el CIBNOR, y sobre los principales retos para consolidar el enfoque de Una Salud en los Programas Académicos y en el Posgrado del CIBNOR. A continuación, presentamos un resumen de lo presentado en este primer Foro Una Salud.

Una Salud en el Programa de Acuicultura (PAC) del CIBNOR

Actualmente, y como ejemplo de la relación entre Una Salud y la investigación en acuicultura, uno de los proyectos del Programa de Acuicultura (PAC) aborda la condición de salud y el cultivo prospectivo de almeja mano de león, a raíz del colapso de este recurso pesquero en la laguna Ojo de Liebre hace más de diez años. La población de estas almejas en la laguna fue sujeta a una infestación de poliquetos y esponjas perforadores en la almeja debilitándola hasta su muerte (salud animal) como probable consecuencia de alteraciones ambientales-deterioro del hábitat (salud ambiental), lo cual afectó seriamente el bienestar socioeconómico de las comunidades ribereñas de la localidad (salud humana). La posible solución a esta problemática se enmarca perfectamente en el enfoque de Una Salud. Se trata de realizar monitoreos ambientales de la laguna Ojo de Liebre (salud ambiental) en relación con la salud de poblaciones naturales, y a futuro cultivadas, de almeja mano de león (salud animal) y también cómo repercuten los cultivos, ya sea actuales de ostión o potenciales de almeja mano de león, sobre el ambiente en el contexto de capacidad de carga (salud ambiental). Todo ello con el fin de asegurar la seguridad alimentaria y el bienestar socioeconómico de las comunidades ribereñas (salud humana).

Al igual que en el ejemplo anterior, podríamos considerar otros proyectos con el enfoque de Una Salud y es por ello que, en el PAC, se anexó la temática de Una Salud a la línea estratégica de Biotecnología en Plancton, por ser la más cercana a salud animal y humana, considerando el plancton como una fuente de nutraceuticos, inmunoestimulantes, etc. Tanto en el programa de investigación (Coordinación del Programa) como en la orientación de posgrado (Academia) en Acuicultura, se identifica claramente un componente muy fuerte de salud animal que, en general, está dirigido al beneficio de la salud humana tanto porque los productos acuícolas (moluscos, crustáceos y peces) son considerados alimentos sanos, como por el bienestar socioeconómico que se busca con la actividad. El componente ambiental es más visible en la industria prevaleciente en México, que es la camaronicultura, con la búsqueda de estrategias de cultivo cada vez más ecoeficientes con máximo aprovechamiento de nutrientes y mínima pérdida al ambiente. Esto, indudablemente, tendrá que ser considerado también para el cultivo de peces. En el caso de moluscos, la problemática ambiental es ligeramente diferente por depender de alimento natural y, por ende, la capacidad de carga empieza a cobrar cada vez más importancia. En segundo lugar, los moluscos, así como el plancton y las macroalgas, pueden representar un sistema biorremediador de otros cultivos que promueve la salud ambiental.

Una Salud en el Programa de Planeación Ambiental y Conservación (PLAYCO) del CIBNOR

Desde principios del 2024 se formalizó dentro del Programa de Planeación Ambiental y Conservación (PLAYCO) del CIBNOR la línea de investigación Una Salud (<https://www.cibnor.gob.mx/investigacion/planeacion-ambiental-y-conservacion/lineas-de-investigacion-ppac/una-salud>). Con ello, se reconoce que a lo largo de los años se ha venido aplicando este enfoque en diversas investigaciones dentro del PLAYCO. Por ejemplo, en este Programa se realiza investigación enfocada a la ecotoxicología, la cual se alinea naturalmente con el enfoque de Una Salud. Estos estudios se enfocan en la exposición a contaminantes, como el mercurio (Hg), en vertebrados marinos, evaluando cómo estos contaminantes se mueven a través de la cadena trófica (cadena alimenticia), desde la base hasta los depredadores tope. La presencia de Hg en la cadena trófica refleja la calidad del ambiente y, por lo tanto, implica consideraciones sobre la salud ambiental. Además, al detectar Hg en los tejidos de peces, tiburones, entre otros, se aborda la salud animal, y al ser algunas de estas especies consumidas por los humanos, hablamos de salud humana.

La investigación en ecotoxicología ilustra cómo la salud ambiental, animal y humana están interrelacionadas, lo que contribuye directamente a los objetivos del PLAYCO, que incluyen conservar la biodiversidad, la salud ambiental y los servicios ecosistémicos para fortalecer la resiliencia ecológica y social. Un número importante de proyectos de investigación en los que participa (o ha participado) personal de PLAYCO se enfoca en promover la integridad de los ecosistemas, contribuyendo al desarrollo socioeconómico y a la calidad de vida de la sociedad mexicana, especialmente en el Noroeste de México, en relación con los procesos que inciden sobre la salud humana, animal y ambiental. Estos estudios contribuyen a la generación de conocimiento que facilita la comprensión de la interdependencia entre estos tres ámbitos, lo que es crucial para abordar los desafíos ambientales y sanitarios que enfrenta nuestra región.

Existe una base sólida de evidencia que demuestra que los problemas como el de contaminación son complejos y multidimensionales, lo que exige un enfoque integral para su resolución. En el PLAYCO, esta perspectiva multidisciplinaria permite adoptar una visión integral de la conservación y la gestión ambiental. Un ejemplo claro de ello es la investigación sobre la exposición a contaminantes. En este tipo de estudios, no sólo es crucial evaluar la presencia de los contaminantes en el ambiente, sino también considerar los factores interrelacionados, como la actividad microbiana, el cambio climático (que influye en la frecuencia de lluvias), el crecimiento urbano y la gestión de desechos. Estos factores no actúan de manera independiente, sino que interactúan entre sí, lo que resalta la necesidad de un enfoque integral para comprender su impacto conjunto en los ecosistemas y en la salud de las especies, incluyendo los humanos.

Una Salud en el Programa de Agricultura en Zonas Áridas (PAZA) del CIBNOR

En el Programa de Agricultura en Zonas Áridas (PAZA) la línea de investigación enfocada al desarrollo de vacunas se inserta perfectamente en el enfoque de Una Salud. La vacunación es una herramienta fundamental para prevenir enfermedades y promover la salud en todos los seres vivos, que contribuye directamente a prevenir enfermedades zoonóticas (enfermedades infecciosas que se transmiten entre animales y humanos) rompiendo el ciclo de transmisión, protegiendo tanto a la población humana como a la animal. También las vacunas permiten mejorar la salud animal a través de la prevención de enfermedades en animales de granja, mascotas, e inclusive animales silvestres que podrían ocasionar enfermedades emergentes. Ello, a su vez, mejora la seguridad alimentaria y el bienestar animal. Las vacunas reducen la incidencia de enfermedades infecciosas y contribuyen

al fortalecimiento de los sistemas de salud pública y a la disminución de los costos asociados a la atención médica. Además, con las vacunas se puede promover la salud ambiental ya que algunas enfermedades infecciosas pueden afectar a la vida silvestre y a los ecosistemas. Al desarrollar vacunas para proteger a los animales silvestres se puede contribuir a la conservación de la biodiversidad.

En el contexto del PAZA, la investigación que se realiza busca mejorar la salud de los animales, principalmente de producción, que son fundamentales para la seguridad alimentaria y el sustento de las comunidades rurales. Al desarrollar vacunas más eficaces, podemos prevenir enfermedades que afectan al ganado, reduciendo las pérdidas económicas y mejorando el bienestar animal. Además, la orientación en agricultura nos permite comprender las particularidades de los sistemas productivos en zonas áridas y cómo las prácticas agrícolas pueden influir en la salud animal y humana. Por ejemplo, la gestión inadecuada del agua o el uso de plaguicidas pueden aumentar el riesgo de enfermedades en animales, plantas, humanos e impactar severamente en la salud del ecosistema.

En el contexto global actual, marcado por el cambio climático y la creciente interconexión entre la salud humana, animal, vegetal y ambiental, el enfoque de Una Salud se presenta como una herramienta fundamental para garantizar la sostenibilidad de la agricultura en zonas áridas. El CIBNOR, como institución pionera en la investigación de estos ecosistemas, tiene un papel clave en la promoción de este enfoque. Sin embargo, es necesario enfatizar la importancia de fortalecer las colaboraciones entre investigadores de diferentes disciplinas (agronomía, veterinaria, ecología, salud pública, etc.) para abordar los problemas complejos relacionados con la agricultura y la salud. Lo anterior puede lograrse a través de la aplicación de nuevas tecnologías (como la biotecnología, la ingeniería genética, la vacunología e inclusive la inteligencia artificial) que pueden contribuir a mejorar la salud de los agroecosistemas y a desarrollar prácticas agrícolas más sostenibles. Es importante destacar la necesidad de formar profesionales capacitados en el enfoque de Una Salud y de establecer alianzas con productores, gobiernos, organizaciones de la sociedad civil y la academia para promover la adopción de prácticas agrícolas sostenibles y saludables, beneficiando, por ejemplo, a los agricultores y ganaderos para mejorar la productividad, reducir los costos de producción y aumentar la resiliencia de los sistemas productivos.

Una Salud en el Programa de Ecología Pesquera (PEP) del CIBNOR

La mayor parte de la investigación con enfoque de Una Salud que se realiza en el ámbito de la producción de alimentos se ubica en las agro ciencias y, dentro de la producción de alimento de origen marino, en la acuicultura, debido a la influencia directa del humano en la salud de los organismos en cultivo. Sin embargo, en un sentido más amplio y desde la visión de la Ecología Pesquera, podemos entender como componentes:

- A. Salud humana, tanto en términos de las potenciales enfermedades derivadas del consumo de productos de origen marino, como de los beneficios a la salud que proporciona el consumo de alimento de alta calidad; es decir, la contribución de la pesca a la seguridad alimentaria que incluye la disponibilidad, la accesibilidad y la calidad de los alimentos.
- B. Salud animal como la respuesta de los organismos y sus poblaciones ante la presión de origen humano, como contaminantes, degradación ambiental y la propia extracción pesquera.
- C. Salud del ecosistema como la vigilancia de la integridad de los sistemas naturales y cómo son afectados por factores externos, como la extracción pesquera, otros factores de origen humano y la propia variabilidad ambiental.

Tanto la FAO, como diversas agencias de investigación y financiamiento en diferentes regiones del mundo buscan cada vez más el desarrollo de investigaciones integrales y transdisciplinarias, con influencia en dos o más de los objetivos de desarrollo sostenible de la Naciones Unidas (ONU, 2015) y, en general, declaran como deseable el enfoque de Una Salud. Es decir que, en la medida que la investigación en el CIBNOR adopte el enfoque, se garantiza la pertinencia de la investigación y aumentan las oportunidades de colaboración y obtención de financiamiento. Desde la perspectiva de la Ecología Pesquera no partimos de cero, ya que desde hace mucho tiempo se hace investigación que podría ubicarse en iniciativas de este tipo. Ejemplos de ellos son la evaluación de la calidad de los alimentos, tanto del producto para consumo humano directo como de subproductos y productos de valor agregado, el estudio de los impactos de la pesca en la capacidad productiva y la salud de los ecosistemas marinos, el análisis de estrategias de producción pesquera para asegurar la disponibilidad y accesibilidad del alimento, así como del potencial de transmisión de enfermedades por consumo de pescados y mariscos.

Por supuesto, existen diversos retos que enfrentaremos a medida que tratemos de adoptar el enfoque de Una Salud en la investigación de Ecología Pesquera, tanto en el ámbito individual y de las líneas estratégicas del Programa, como a nivel institucional. Entre ellos se incluyen la disposición

para colaborar con otras disciplinas (tanto a lo interno del centro como entre instituciones, sean nacionales o internacionales) y vencer la resistencia a pensar la actividad de investigación en contextos más amplios que los que el investigador individual está acostumbrado. Más aún, este cambio de paradigma debe ir acompañado de facilidades y flexibilidad administrativa y normativa por parte de las instituciones, y de herramientas como, por ejemplo, una suerte de observatorio científico para encontrar los aliados más adecuados y complementarios.

Para aumentar las posibilidades de ubicar financiamiento y colaboraciones, se requiere hacer más visibles las capacidades institucionales y hacer evidente que se está trabajando en el tema. Parte del éxito del CIBNOR en el pasado ha sido su prestigio en el desarrollo de temas, como acuicultura, conservación y la participación en planeación ambiental, en investigación sobre recursos agrícolas de zonas áridas y la investigación en pesquerías. En el entorno actual, el Centro podría encontrar como fortaleza no sólo mantener ese prestigio, sino extenderlo más explícitamente hacia las nuevas visiones y temas que están surgiendo en el mundo, como la transformación azul (FAO), la agroecología, el cambio climático o el enfoque de Una Salud. Se requiere construir y fortalecer plataformas que hagan más visibles las capacidades institucionales, a través del posgrado o de proyectos de amplio alcance, pero también de la incorporación de este lenguaje en los nombres de los programas, líneas, academias, etc.

Al finalizar el Primer Foro Una Salud: Diálogos, Debate y Conciencia, y con base en las preguntas y comentarios de los participantes, fue evidente que la mayoría de los presentes tienen un desconocimiento o cierta confusión general sobre Una Salud. Los cuestionamientos y comentarios vertidos durante la sesión de diálogo y debate reflejan que hay dos preguntas principales por las cuales la mayoría de los investigadores están renuentes o inseguros a incluir el enfoque de Una Salud en sus proyectos de investigación. Abordaremos cada una de estas preguntas a continuación.

¿Cuáles son las características deseables en un proyecto de investigación bajo el enfoque de Una Salud?

Por definición, cualquier proyecto de investigación que pretenda abordarse bajo el enfoque de Una Salud debería estudiar un problema identificado en la intersección entre la salud humana, la salud animal y la salud ambiental. Idóneamente, el proyecto abordará un tema que afecte simultáneamente a humanos, animales y el ambiente. Entre los temas a los que se ha dado mayor difusión se incluyen enfermedades zoonóticas, seguridad alimentaria y bienestar socio-económico, salud pública, salud y bienestar animal, control de vectores, biodiversidad, cambio climático, deforestación, contaminación, entre otros. Por lo tanto, un proyecto de investigación bajo el enfoque

de Una Salud será de carácter interdisciplinario o, en el mejor de los casos, transdisciplinario. Esto es, el proyecto debe incluir la participación de múltiples disciplinas (por ejemplo, combinar conocimientos de medicina humana, medicina veterinaria, biología, ecología, ciencias sociales y economía) y la colaboración de expertos que trabajan en diferentes áreas de especialidad (como taxónomos, epidemiólogos, antropólogos, historiadores, arquitectos y nutriólogos).

Un proyecto bajo el enfoque de Una Salud tratará de analizar un problema de manera integral, identificando e incluyendo las partes que intervienen en ese problema, sus propiedades, funciones e interacciones desde una perspectiva sistémica. Adicionalmente, un proyecto bajo el enfoque de Una Salud buscará involucrar la participación, directa o indirecta de diferentes sectores además del académico; por ejemplo, el sector gubernamental, el sector educativo, organizaciones de la sociedad civil (OSC), comunidades locales, y/o el sector privado, tanto a nivel nacional como internacional. Contar con estas alianzas estratégicas a nivel intersectorial desde el inicio del proyecto brindan la ventaja de que la implementación de los resultados al final del proyecto para resolver la problemática inicial será más rápida y, posiblemente, sostenible.

Para contestar una pregunta de investigación interdisciplinaria, transversal o transdisciplinaria, se requiere el diseño de estudios integrados, con enfoques mixtos que combinen métodos cuantitativos (como modelos matemáticos, estudios epidemiológicos, análisis estadísticos) y métodos cualitativos (como entrevistas, análisis de políticas, observaciones para entender comportamientos humanos y tendencias sociales). Un proyecto de investigación bajo el enfoque de Una Salud incluirá el monitoreo y el análisis en conjunto de datos relacionados a algún aspecto de la salud humana, la salud animal y la salud ambiental. En el diseño y, sobre todo, en la implementación de un proyecto de investigación bajo el enfoque de Una Salud se deben tener en cuenta factores sociales y culturales, políticos y económicos, enfocándose en problemas locales con una perspectiva global (o viceversa), buscando siempre soluciones que reduzcan el impacto ambiental y promuevan la conservación de los ecosistemas, y dándole preferencia a desarrollar estrategias preventivas.

Un proyecto de investigación bajo el enfoque de Una Salud tendrá el objetivo de mejorar la calidad de vida, para lo cual procurará obtener resultados que sean fácil y rápidamente aplicables y relevantes para la sociedad, y buscará diseñar innovaciones tecnológicas y/o políticas públicas más efectivas. Un ejemplo de un proyecto de investigación bajo el enfoque de Una Salud sería un proyecto que, de manera integral y en colaboración intersectorial, evalúe el impacto de la construcción de edificios de departamentos en la ciudad de La Paz en la demanda y el

abastecimiento de agua, la modificación de hábitats, cambios en poblaciones de insectos vectores de enfermedades, la transmisión de enfermedades zoonóticas, y la calidad de vida y bienestar de la población de humanos.

¿Cómo puedo participar en un proyecto de investigación bajo el enfoque de Una Salud y abordar la salud humana si no soy médico, no trabajo con pacientes y mi tema de investigación no tiene incidencia directa en alguna enfermedad?

Para comenzar a contestar esta pregunta, recordemos la definición de Salud según la OMS, “el estado de completo bienestar físico, mental y social” (WHO, 2025). Una primera opción para abordar la salud humana, aunque nuestra investigación no tenga incidencia directa en enfermedades específicas o no trabajemos con pacientes, es colaborar con expertos de campos académicos que aporten información, conocimientos y métodos sobre la salud humana. Se puede considerar, como ya se hace en muchos de los proyectos de investigación en CIBNOR, aspectos socioeconómicos y de bienestar social, o cómo la investigación puede tener aplicaciones indirectas en la salud humana, por ejemplo, a través de desarrollos tecnológicos alternativos. Así, en proyectos de investigación en Ecología Pesquera, Acuicultura y Desarrollo Agropecuario, se buscan opciones para obtener alimentos suficientes y de calidad que inciden, quizá de manera indirecta, en la prevención de enfermedades y promoción de la salud. El uso de datos epidemiológicos y modelos matemáticos para entender tendencias y prever posibles escenarios futuros puede contribuir a la salud pública; por ejemplo, la relación entre la temperatura ambiental, el nivel del mar o la frecuencia e intensidad de huracanes y la presencia de cuadros de ansiedad, depresión o estrés postraumático en la población de humanos en las zonas afectadas por estos eventos climáticos. Se pueden abordar temas de salud humana a través de ejercicios teóricos, de preferencia a través de una revisión de literatura relacionada a alguno de los aspectos (físico, mental, social) que contribuyen a la salud humana.

Entre los proyectos de investigación que se llevan a cabo actualmente en CIBNOR bajo el enfoque de Una Salud se encuentran los siguientes. En colaboración con colegas del Colegio de Medicina Veterinaria y Ciencias Biomédicas de CSU, se están estudiando patógenos transmitidos por pulgas a gatos y patógenos transmitidos a través del alimento (carne cruda) en gatos. En colaboración con colegas del Departamento de Entomología del Colegio de Medicina Veterinaria y Ciencias Biomédicas de la Universidad A & M de Texas (TAMU), se está analizando a la chinche de piedra como potencial reservorio de *Trypanozoma cruzi*, causante de la enfermedad de Chagas. También en colaboración con colegas del Colegio de Medicina Veterinaria y Ciencias Biomédicas, Departamento de Biociencias Veterinarias Integrativas de TAMU, se están evaluando las

concentraciones de metales en peces y mamíferos marinos en el Golfo de California. En colaboración con colegas de la Universidad Autónoma de Baja California Sur y el Instituto Tecnológico de La Paz se están desarrollando estrategias biotecnológicas, incluyendo el diseño de vacunas, para controlar enfermedades como el cáncer bacteriano del tomate (*Solanum lycopersicum*), contra la enteritis aviar causada por *Campylobacter jejuni*, así como el desarrollo de adyuvantes para la administración de vacunas por vía oral. En todos los proyectos están colaborando estudiantes de pre- y posgrado (Kevyn Martín Guerra Contreras, Víctor Hernández Ayala, Alejandra Cisneros Geraldo, Hassian León Montoya, Jorge Mendoza Castro, Sergio Rodríguez González, Valeria Beltrán Valdivia, Juan Marín León Frías, María José Pedrín, Melissa Borri, Valeria López Manzano) quienes están desarrollando tesis de investigación para titulación. En este contexto, el Laboratorio Nacional CONAHCYT de Generación de Vacunas Veterinarias y Servicios de Diagnóstico (LNC-GVD), en el que se desarrollan actividades científicas utilizando el enfoque Una Salud, agrupa en colaboración a las siguientes instituciones: Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD), Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ), Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS), TNM-Instituto Tecnológico de la Paz (TNM-ITLP) y el CIBNOR. Además, conviene referir el Acta del Comité Externo de Evaluación del CIBNOR (15 de marzo de 2024) en la que se indica “Se reconoce la importancia de incluir el enfoque “Una Salud” a los proyectos vinculados a comunidades locales y estatales, lo que permitirá una vinculación de influencia directa con la gente” (CIBNOR, 2024).

Percepción del futuro de Una Salud en CIBNOR

El enfoque de Una Salud tiene un futuro prometedor en CIBNOR. A nivel institucional y nacional, el contexto actual refleja un creciente reconocimiento de la necesidad de integrar la salud humana, animal y ambiental para abordar problemas complejos como la contaminación, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático. Sin embargo, es crucial entender que no se está adoptando el enfoque Una Salud simplemente porque esté de moda. Esta visión integradora contribuye al éxito de lograr financiamiento para resolver problemáticas relevantes en la actualidad. El CIBNOR, con su fuerte orientación hacia la investigación aplicada y su historial de participación en análisis de planes de manejo de áreas naturales, de poblaciones de flora y fauna, tanto terrestre como marina, podría posicionarse entre las instituciones líder en la generación de conocimiento científico y en la formación de recursos humanos capacitados para enfrentar los desafíos ambientales y sanitarios bajo el enfoque de Una Salud.

Por lo anterior, en el CIBNOR, dos de cuatro programas académicos han implementado el enfoque de Una Salud en sus líneas estratégicas, y su consolidación en general depende del proceso de planeación estratégica. El enfoque de Una Salud debería ser transversal a las líneas estratégicas y los programas académicos, aprovechando el componente más fuerte de cada programa, por ejemplo, salud animal y vegetal en el PAC y PAZA, y salud ambiental en el PEP y PLAYCO. La salud humana es identificable como componente directo (salud física) o indirecto (seguridad alimentaria y bienestar socioeconómico) en los cuatro Programas de CIBNOR. Fomentar mayor colaboración entre investigadores de diversas disciplinas, a través de la innovación tecnológica y la formación de recursos humanos altamente capacitados, permitirá proponer soluciones sostenibles que permitan mejorar la salud de plantas, animales y ecosistemas, contribuyendo a garantizar la seguridad alimentaria y, por ende, la salud humana. A futuro se debe, entonces, considerar la posible creación de una línea estratégica transversal que pueda agrupar los tres componentes de Una Salud a través de proyectos que impliquen la participación de especialistas de dos o más programas. El pensar en un programa académico propio de Una Salud sería motivo de reflexión a largo plazo, que dependerá del curso evolutivo de las líneas Una Salud por programa o una línea Una Salud transprogramas.

A nivel posgrado, si bien el enfoque de Una Salud podría ser incorporado prácticamente en las cinco orientaciones existentes en CIBNOR, en cuanto a temas de tesis y cursos, no hay iniciativas concretas de cómo insertarlo. Probablemente sería factible crear una orientación de Una Salud que englobe todos los temas de tesis donde se identifiquen claramente los tres componentes y a través de la cual se oferten cursos enfocados con el concepto de Una Salud. Este es un tema que representa un reto administrativo y que deberá ser considerado ampliamente en el proceso de planeación estratégica que deberá darse en el corto plazo.

Principales retos para consolidar el enfoque de Una Salud en CIBNOR

Los principales retos para implementar el enfoque de Una Salud en la investigación y el posgrado de CIBNOR incluyen varios aspectos clave. En primer lugar, la necesidad de financiamiento estable para proyectos multidisciplinarios es crucial, ya que estos requieren recursos a largo plazo para su desarrollo. Además, es esencial fortalecer las colaboraciones entre disciplinas que aparentemente son muy diferentes, como la medicina, la ecología y las ciencias ambientales, para fomentar un enfoque verdaderamente integrado. A nivel institucional, es fundamental promover una mayor participación entre las distintas áreas de investigación y formar profesionales con una visión de Una

Salud desde los inicios de su formación académica. Afortunadamente, y para consulta, en la revista institucional del CIBNOR se han publicado artículos de divulgación útiles para estudiantes y personal académico interesados en el enfoque de investigación Una Salud (p.ej. Angulo *et al.*, (aceptado); Murillo-Cisneros *et al.*, 2024; Mendoza Montijo *et al.*, 2023; Zenteno-Savín *et al.*, 2017, 2023, 2024; Castro-Cosío *et al.*, 2021; Angulo *et al.*, 2019).

A nivel nacional, es deseable que parte de la agenda de la nueva Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) incorpore el enfoque Una Salud a nivel de convocatorias de investigación, articulación de redes de investigación y Laboratorios Nacionales, así como la creación y consolidación de programas de posgrado. Lo anterior requiere socialización por medio de diferentes mecanismos de difusión y divulgación, así como definición y simplificación de procesos administrativos.

La cooperación internacional, considerando los aspectos culturales específicos de cada país, es clave para abordar problemas complejos como la biodiversidad, la contaminación y el cambio climático, ya que estos desafíos trascienden fronteras. Por ello, es necesario fortalecer redes de colaboración internacional que permitan compartir datos y metodologías para enfrentar problemas globales de manera efectiva. Además, para favorecer la implementación del enfoque Una Salud se requiere, tanto a nivel nacional como internacional, un marco legal que apoye regulaciones basadas en evidencia científica de tal manera que se garantice que la investigación no sólo aporte conocimiento, sino que también promueva políticas públicas efectivas para el manejo sostenible de los recursos naturales y la salud pública.

Conclusiones y recomendaciones

A pesar de lo que aún piensan muchos, y de que la frase Una Salud se conoce apenas desde el 2004, el concepto no es nuevo. Hay evidencia documental de que desde los años 400 a.C. Hipócrates hablaba de la relación de las condiciones ambientales y climáticas con la presencia de enfermedades infecciosas. Por lo tanto, el abordaje de los proyectos de investigación bajo el enfoque de Una Salud no es una moda que pueda cambiar con el tiempo, aún si logramos acuñar y adoptar una palabra o una frase diferente para referirnos al mismo concepto. A nivel internacional, hay un creciente reconocimiento por integrar la salud animal, la salud vegetal, la salud ambiental y la salud humana en el abordaje de problemas complejos reconocidos mundialmente, como el

cambio climático, la biodiversidad, la contaminación, la seguridad alimentaria y la calidad del aire y el agua.

De manera análoga al reconocimiento de que actualmente tenemos suficiente información en diferentes áreas académicas que nos permite abordar problemas complejos a nivel integral, quizá debemos reconocer que, a diferencia de antaño, ahora necesitamos trabajar en colaboración con colegas expertos en diferentes disciplinas. El éxito de la incorporación del enfoque de Una Salud a través de colaboraciones interdisciplinarias con un enfoque transdisciplinario en otras instituciones, como CSU, TAMU, CIAD, CIATEJ, CICESE, UABCS, UABC e ITLP, y el apoyo de agencias de administración y financiamiento internacional, como la OMS y la FAO, manifiestan deseable la inclusión del enfoque de Una Salud a los proyectos de investigación y a los temas de tesis de posgrado y sugiere que el CIBNOR se beneficiará enormemente de ello. Integrar el enfoque de Una Salud en proyectos de investigación y posgrado, permitirá que el CIBNOR colabore más estrechamente en la formulación de políticas públicas que mejoren el manejo de recursos, la salud pública y el bienestar de las comunidades más vulnerables, especialmente en el Noroeste de México, promoviendo un desarrollo sostenible. Finalmente, la divulgación científica y la educación pública, a todos los niveles, son esenciales para informar y sensibilizar a la sociedad en general sobre la interconexión entre la salud del ecosistema, la salud animal, la salud vegetal, y la salud humana.

Referencias

- Angulo, C., D.A. Murillo-Cisneros, E. Monreal, Maeda-Martínez, M.A., R. Gaxiola-Robles y T. Zenteno-Savín. 2025. Una Salud en Baja California Sur: Reflexiones y propuesta estratégica. Recursos Naturales y Sociedad, (aceptado).
- Angulo, M., K. Delgado, M. Reyes, E. Monreal, G. Palestino, G. Gómez, C. Escobedo, P. Magallón, T. Zenteno, R. Leyva, S. Rosales, K. Guerra, L. Hernández Adame, L. Hernández Montiel, A. Loera, D. Tovar, H. Mejía, R. Gaxiola, G. Rincón y C. Angulo. 2019. Primer Simposio Nacional en Salud Humana, Animal, Vegetal y Ambiental. Recursos Naturales y Sociedad, 2019. Vol. 5 (2): 68-78. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2019.05.05.02.0007>.

Castro Cosio P., I. Fuentes Corona y C. Angulo. 2021. ¿Podríamos anticiparnos a otras pandemias? Una Salud: una estrategia integral de prevención y control. Recursos Naturales y Sociedad, 7 (3): 129-145. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2021.07.07.03.0010>

CIBNOR. 2021. Acta Constitutiva. En: <https://sistemas.cibnor.mx/normateca/MostrarPDF?Id=NORMATECA-DOCUMENTO-32.PDF>. (Consultado el 14 de enero de 2025).

CIBNOR. 2022. Misión, Visión y Objetivos. En: <https://www.cibnor.gob.mx/acercadelcibnor/mision-vision-y-objetivos#:~:text=Ser%20el%20Centro%20P%C3%BAblico%20de,menos%20favorecidos%20y%20m%C3%A1s%20vulnerables>. (Consultado el 14 de enero de 2025).

CIBNOR. 2024. ACTA-C33-2024. En: <https://www.cibnor.gob.mx/images/stories/transparencia/ACTA-CEE-2024.pdf>. (Consultado el 14 de enero de 2025).

FAO. 2025. Una sola salud. En: <https://www.fao.org/one-health/es>. (Consultado el 14 de enero de 2025).

Gobierno de México. 2025. Sistema de centros públicos. En: <https://secihtl.mx/conahcyt/areas-del-conahcyt/uasr/sistema-de-centros-de-investigacion/>. (Consultado el 14 de enero de 2025).

Mendoza Montijo, L.M., D.A. Murillo-Cisneros, R. Gaxiola-Robles, C. Angulo, O. Lugo-Lugo, y T. Zenteno-Savín. 2023. One Health, Una Salud ¿Qué es? ¿Para qué sirve? Recursos Naturales y Sociedad, 9 (3): 17-30, <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2023.09.09.03.0003>

Murillo-Cisneros D.A., T. E. Symon, O. Lugo-Lugo y T. Zenteno-Savín. 2024. Una Salud en toxicología: El enfoque Una Salud en la protección del ambiente. Recursos Naturales y Sociedad, 10 (1): 01-13. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2024.10.10.01.0001>

OMS. 2023. “Una sola salud” plan de acción conjunto (2022-2026): trabajar juntos por la salud de los seres humanos, los animales, las plantas y el medio ambiente. Roma. 88 pp. ISBN: 978-92-4-007596-2.

OMS. 2025. Preguntas frecuentes: ¿Cómo define la OMS el concepto de salud? En: <https://www.who.int/es/about/frequently-asked-questions#:~:text=%C2%BFC%C3%B3mo%20define%20la%20OMS%20el,ausencia%20de%20afecciones%20o%20enfermedades.%C2%BB>. (Consultado el 14 de enero de 2025).

- One World, One Health. 2004. One World, One Health: Building Interdisciplinary Bridges to Health in a Globalized World. En: https://www.oneworldonehealth.org/sept2004/owoh_sept04.html. (Consultado el 14 de enero de 2025).
- ONU. 2015. Objetivos de desarrollo sostenible. En: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. (Consultado el 14 de enero de 2025).
- OPS. 2024. Funciones esenciales de salud pública. En: <https://www.paho.org/es/temas/funciones-esenciales-salud-publica>. (Consultado el 14 de enero de 2025).
- Schwabe, C. 1984. Veterinary medicine and human health. 3a. ed. Baltimore, Ed. Williams & Wilkins 680 p. ISBN: 0683075942.
- WHO. 2025. One health. En: https://www.who.int/health-topics/one-health#tab=tab_1. (Consultado el 14 de enero de 2025).
- Zenteno-Savín, T., D.A. Murillo-Cisneros, C. Angulo, S.C. Díaz-Castro, M.C. Reyes-Becerril, A.M. Maeda-Martínez, M. Rodríguez Álvarez, O. Lugo-Lugo, y R. Gaxiola-Robles. 2023. El efecto del cambio climático bajo el enfoque de Una Salud. Recursos Naturales y Sociedad, 9 (3): 31-42, <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2023.09.09.03.0004>
- Zenteno-Savín, T., D. Straatmann, K.P. Huyvaert, C. Tucker, A. Castro-Prieto y B. Sobral. 2017. Conferencia sobre Una Salud en Las Americas. Recursos Naturales y Sociedad, 3 (2): 4-10. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2017.03.03.02.0001>.
- Zunino, P. 2018. Historia y perspectivas del enfoque “Una Salud”. Veterinaria (Montevideo) 54 (210), 46-51. <https://doi.org/10.29155/VET.54.210.8>.

Cita

Angulo C., I. S. Racotta, S. E. Lluch-Cota, E. Monreal-Escalante, D.A. Murillo-Cisneros, C. Castro y T. Zenteno-Savín. Enfoque de una salud en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), S.C. memorias del Primer foro Una Salud, Debate y Conciencia. 2025. Vol. 11 (1): 226-244. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0015>

Sometido: 14 de febrero de 2025

Aceptado: 16 de abril de 2025

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editor asociado: Dr. Mauricio Muñoz Ochoa

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrasco

Fishes, bacteria and microbiota

Peces, bacterias y microbiota

Edén Vladimir Gaitán-Morado^{1*} y Antonio Luna-González²

Resumen

Durante los últimos años las nuevas tecnologías de secuenciación han permitido conocer la composición de la microbiota, que es un conjunto de microorganismos conformada por protozoarios, hongos, virus y bacterias que habitan en diversos grupos taxonómicos como los peces. Pero poco se conoce sobre la influencia que tienen, por ejemplo, las bacterias en la fisiología del pez y su entorno. Las cuales se adhieren a la piel y branquias durante el nacimiento ingresan al tracto gastrointestinal durante la primera alimentación, provenientes del agua y sedimentos presentes en el ambiente. Las comunidades bacterianas pueden verse afectadas por las condiciones ambientales como la temperatura. Algunos grupos bacterianos como los probióticos pueden mejorar la calidad del agua donde habitan los peces. En el tracto digestivo del pez mejoran la absorción de nutrientes y pueden producir algunas vitaminas, estimular la respuesta inmune, prevenir enfermedades mediante la producción de compuestos bactericidas y competir por nutrientes contra potenciales patógenos. Sin embargo, aún falta estudiar cómo es que las bacterias interactúan con el hospedero, ambiente y otros grupos bacterianos y el impacto que esto implica sobre la condición de vida de los peces.

Palabras clave

Peces, probióticos, microbiota, ambiente, fisiología.

^{1*} Laboratorio de Biología Acuática, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. General Francisco J. Múgica S/N. C.P. 58030. Morelia, Michoacán, México.

² Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-Unidad Sinaloa, Departamento de Acuacultura. Boulevard Juan de Dios Bátiz Paredes #250, Col. San Joaquín, Guasave, Sinaloa, 81101, México.

* Autor de correspondencia: E-mail: eden.vgm@gmail.com



Abstract

In recent years, new sequencing technologies have allowed us to understand the microbiota composition, a set of microorganisms including protozoa, fungi, viruses, and bacteria inhabiting various taxonomic groups such as fish. However, little is known about the influence that, for example, bacteria have on the physiology of fish and their environment. These bacteria adhere to the skin and gills during birth and enter the gastrointestinal tract during the first feeding, coming from water and sediments in the environment. Bacterial communities can be affected by environmental conditions such as temperature. Some bacterial groups, like probiotics, can improve the water quality where fish live. In the digestive tract of the fish, they enhance nutrient absorption, can produce some vitamins, stimulate immune response, prevent diseases by producing bactericidal compounds, and compete for nutrients against potential pathogens. However, there is still a need to study how bacteria interact with the host, the environment, and other bacterial groups and the impact this has on the living conditions of fish.

Keywords

Fish, probiotics, microbiota, environment, physiology.

Antecedentes

La tierra a lo largo de sus diferentes eras geológicas ha presenciado la explosión de diversas formas de vida, un ejemplo son los peces, aparecieron hace casi 600 millones de años y actualmente representan cerca de la mitad de todos los vertebrados en el mundo. Los peces, al igual que otros seres vivos, desarrollaron asociaciones con una variedad de microorganismos, a lo que se le conoce como microbiota, constituida por protozoarios, hongos, levaduras, bacterias, arqueas y virus. Estas asociaciones proporcionan una mejora en su condición fisiológica como el metabolismo, nutrición, homeostasis y respuesta inmune (Johny *et al.*, 2021).

Primeras etapas de vida de los peces y su microbiota

Los peces durante su desarrollo embrionario tienen adheridos en la parte externa del huevo algunos grupos bacterianos como *Pseudomonas*, *Flavobacterium* y *Cytophaga*. Las larvas, al momento de nacer, entran en contacto con microorganismos presentes en el huevo y agua. Sin embargo, cada especie de pez tiene variaciones en las uniones de glicoproteínas (proteína unida a moléculas de

azúcar) que se encuentran en la superficie de los huevos, favoreciendo la adhesión de algunos grupos bacterianos. Otra forma en la que los peces adquieren los microorganismos es por medio del alimento, todo esto ayuda en la colonización de diversas partes del cuerpo como branquias, piel y tracto digestivo (Egerton *et al.*, 2018).

La microbiota en estómago e intestino se forma en función de la primera alimentación y tipo de alimento. Puede estar constituida por comensales que son organismos que alberga el pez para obtener un beneficio, pero también patógenos donde debe de activar algunos mecanismos de defensa para evitar una afectación. En la mayoría de los peces la microbiota se consolida los primeros 50 días de vida, dando lugar a lo que se conoce como microbiota núcleo, el intestino suele estar dominado por bacterias de los filos como Proteobacteria, Bacteroidetes y Firmicutes. Los peces marinos cuentan con una microbiota un poco distinta en comparación con peces de agua dulce, conformada principalmente por géneros como *Vibrio*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Corynebacterium*, *Alteromonas*, *Flavobacterium* y *Micrococcus*. En peces dulceacuícolas dominan *Aeromonas*, *Pseudomonas*, *Bacteroidetes* tipo A, *Plesiomonas*, *Micrococcus*, *Acinetobacter*, *Clostridium*, *Bacteroidetes* tipo B y *Fusarium* (Butt y Volkoff, 2019; Egerton *et al.*, 2018; Guarner, 2007; Wang *et al.*, 2018).

El ambiente y la microbiota

En algunos peces las estaciones del año especialmente verano y otoño provocan cambios en la abundancia y dominancia bacteriana de la microbiota intestinal. Los peces que viven en aguas frías como el Salmón del Atlántico (*Salmo salar*) durante el aumento de temperatura a 21 °C muestran la desaparición de bacterias probióticas del tipo ácido lácticas e incrementan las bacterias potencialmente patógenas como *Vibrio* spp., (Egerton *et al.*, 2018). En los cultivos de Jurel (*Seriola lalandi*), durante los cambios de temperatura de calor a frío se han presentado desequilibrios en la microbiota (disbiosis), favoreciendo el incremento de bacterias como *Vibrio* spp., y *Aliivibrio* sp., (Xavier *et al.*, 2024).

La salinidad es otro factor que modifica la microbiota como se ha demostrado en los salmones que migran del mar a los ríos para reproducirse, cuando se encuentran en agua dulce dominan grupos bacterianos como Bacteroidetes, Firmicutes y Actinobacteria; durante la etapa en el mar incrementa la población de Proteobacterias y Bacteroidetes. En las tilapias (*Oreochromis niloticus*) cultivadas en agua dulce abundan las Actinobacterias, y cuando cambian a salinidades de 24 ups (unidades prácticas de sal), predominan las Fusobacterias. Pero, en el pez Lucio (*Esox lucius*) al parecer la



salinidad no tiene efecto sobre la composición de la microbiota intestinal, por lo que se puede pensar que la microbiota puede adaptarse a las condiciones del agua (Johnny *et al.*, 2021).

El pH del agua puede influir fuertemente sobre la composición de la microbiota como sucede en la tilapia cultivada, donde se encontró que la microbiota transitoria (microorganismos que se encuentran temporalmente sin conformar la microbiota núcleo) presentó variaciones por cambios de pH, pero no así en la microbiota núcleo (Johnny *et al.*, 2021).

Nutrición

Las bacterias transitorias en condiciones normales no pueden alojarse en la mucosa del tracto digestivo. Sin embargo, la microbiota intestinal que constituyen el núcleo si puede adherirse a la mucosa y además tienen la capacidad de resistir los ácidos biliares y enzimas digestivas. Peces herbívoros, omnívoros y carnívoros cuentan con una microbiota específica en función de su dieta, como resultado de un proceso evolutivo y desempeña funciones importantes en la digestión y metabolismo (Butt y Volkoff, 2019).

Los microorganismos pueden regular la expresión de 212 genes relacionados con el metabolismo y respuesta inmune (Wang *et al.*, 2018). Los peces proporcionan alimento y a cambio la microbiota produce enzimas que mejoran la digestión como amilasa, celulasa, lipasa, proteasa, quitinasa y fitasa. También pueden ayudar a regular el almacenamiento de grasa y la absorción de ácidos grasos, como se demostró en experimentos con el pez cebra (*Danio rerio*), donde los microorganismos suprimieron en epitelio intestinal al gen *angptl4* responsable de inhibir la acumulación de grasa (Wang *et al.*, 2018).

Especies de bacterias presentes en el tracto gastrointestinal como *Vibrio sp.*, y *Shewanella sp.*, producen ácidos grasos poliinsaturados, importantes en la nutrición de los peces (Egerton *et al.*, 2018). Peces carnívoros como los Salmones tienen en su intestino *Pseudomonas sp.*, que regula la expresión de genes relacionados con el metabolismo, (Kononova *et al.*, 2019). Los cambios en la microbiota de peces herbívoros como la carpa (*Ctenopharyngodon idella*), modifican las rutas metabólicas, biosíntesis de carbohidratos, aminoácidos y lípidos (Butt y Volkoff, 2019).

Sistema inmune

Los peces carecen de médula ósea y ganglios linfáticos por lo que el sistema inmune se desarrolla a partir de órganos como el timo, bazo, riñón, hígado, branquias e intestino. Como parte de la primera línea de defensa se tiene al sistema inmune innato que reconoce a cualquier agente externo como toxinas o patógenos (Awad y Awaad, 2017).

El sistema inmune adaptativo interactúa con el sistema inmune innato, comunicándose mediante algunas células como macrófagos para poder intercambiar información sobre moléculas específicas (antígenos) de los patógenos y activar mecanismos de defensa como células T y B, inmunoglobulinas, sistema del complemento y responder ante el ataque de manera eficiente (Souza *et al.*, 2019).

Diferentes partes del cuerpo de los peces se encuentran asociados al sistema inmune como el tejido nasofaringe, piel, branquias e intestino los cuales se encuentran recubiertos por una capa de mucosa con componentes inmunológicos como inmunoglobulinas (IgT, IgD y IgM). Algunas bacterias pueden regular las inmunoglobulinas. Sin embargo, la inmunoglobulina IgT permite la presencia de bacterias simbiotes en mucosa (Kelly y Salinas, 2017).

Bacterias como *Enterobacter sp.* producen entericidinas (proteínas tóxicas) que afectan el crecimiento de bacterias patógenas. El poli- β -hidroxibutirato producto del metabolismo de la bacteria *Bacteroidetes thuringiensis*, suministrado en condiciones de laboratorio a la Tilapia, mejora la cantidad de inmunoglobulinas, incluso algunos microorganismos pueden tener efecto antiinflamatorio estimulando algunas moléculas del sistema inmune como las citocinas (Kelly y Salinas, 2017).

Existen estresores en el entorno de los peces como variaciones de pH, temperatura, oxígeno o hacinamiento que pueden afectar algunas partes de la mucosa, causando alteraciones espaciotemporales en la composición microbiana (disbiosis), así como inmunosupresión.

Lo anterior puede facilitar la presencia de agentes patógenos, como sucede cuando las bacterias oportunistas crecen de manera descontrolada favoreciendo la colonización de potenciales patógenos como *Staphylococcus warneri* y *Vibrio anguillarum* (Kelly y Salinas, 2017). Sin embargo, existen patógenos que por sí solos pueden causar disbiosis (Vargas-Albores *et al.*, 2021).



Microbiota y probióticos

El intestino es considerado un órgano diana para evaluar la salud de los peces, cuando se presenta un proceso infeccioso disminuyen las comunidades bacterianas benéficas, e incrementan bacterias oportunistas (Mougin y Joyce, 2023). Sin embargo, existen diversos métodos para equilibrar la microbiota intestinal y así prevenir o controlar infecciones bacterianas, mediante bacterias benéficas conocidas como probióticos (Begum *et al.*, 2017). Se ha demostrado que los probióticos más eficientes son los que se han aislado de intestino y agua (Hai, 2015).

Los probióticos pueden actuar en contra de patógenos produciendo diversos metabolitos con actividad antimicrobiana como enzimas líticas, péptidos no ribosomales, glucopéptidos, lipopéptidos, péptidos cíclicos y bacteriocinas. Los probióticos que suelen emplearse en la acuicultura son *B. amyloliquefaciens*, *B. subtilis*, *B. licheniformes* y *B. pumilus* (Pérez-Chabela *et al.*, 2020).

Los probióticos pueden generar productos benéficos para el pez, modificar la respuesta inmune en mucosas y alterar la actividad de algunos microorganismos comensales, o con capacidad patógena. Como parte del metabolismo de las bacterias se pueden obtener ácidos grasos de cadena corta, importantes para la comunicación entre células del huésped que sirven para desarrollar antagonismo contra patógenos (Pérez-Chabela *et al.*, 2020) (Fig. 1)



Figura 1. Monitoreo de las condiciones de cultivo para la aplicación de probióticos en estanque circular de geomembrana para engorda de tilapia.

Calidad de agua y probióticos

En los cultivos acuícolas semiintensivos e intensivos hay acumulación de desechos, como excedentes de alimento, heces fecales del pez y animales muertos. Los microorganismos presentes en agua y sedimento degradan la materia orgánica por un proceso conocido como oxidación (Hlordzi *et al.*, 2020). Transforman las sobras de alimento en amoníaco, bacterias nitrificantes convierten el amoníaco a nitritos que a su vez dará lugar a nitratos que son menos tóxicos y sirven como nutriente para algas y plantas (Ortiz-Estrada *et al.*, 2021). Derivados del nitrógeno como amoníaco ionizado (NH_3) y nitritos (NO_2) son altamente tóxicos para los peces. El nitrito en concentraciones superiores a 5 mg/L puede oxidar la hemoglobina convirtiéndola a metahemoglobina, la cual ya no puede transportar oxígeno causando intoxicación en el pez (Ruiz *et al.*, 2020).



La materia orgánica presente en los cultivos acuícolas puede ser mitigada por el suministro de bacterias benéficas. Esto puede tener un efecto positivo sobre la calidad de agua del cultivo, y disminuir el impacto en los ecosistemas por efluentes acuícolas (Nathanailides et al., 2021).

Probióticos como los bacilos tienen un efecto positivo en la calidad de agua de los peces, disminuyen la cantidad de fitoplancton dañino, bacterias patógenas y pueden biorremediar los desechos orgánicos del agua de cultivo. Experimentos con *Bacillus licheniformis* y *Bacillus pumilus* en estanques de tierra mostraron un aumento en el pH y disminución del amonio hasta niveles aceptables para la tilapia (Elsabagh et al., 2018).

Los bacilos tienen la capacidad de convertir la materia orgánica en CO₂, nutriente para el fitoplancton que producirá O₂ y bicarbonatos libres, los cuales elevan el pH del agua. El fósforo suele ser empleado como fertilizante en los estanques para acuicultura, pero cuando se encuentra en exceso por la carga de materia orgánica, favorece el deterioro de la calidad del agua, los bacilos consumen este nutriente reduciendo su concentración en el agua (Hlodzi et al., 2020).

Los peces que son cultivados se encuentran expuestos a problemas relacionados con la contaminación del agua provocada por la sobre alimentación, elevadas densidades de siembra, recambios de agua insuficiente y cambios de temperatura, todos estos factores pueden causar modificaciones en la comunidad microbiana del sistema de cultivo y del pez convirtiéndose en factor de riesgo para la salud de los peces (Klase et al., 2019).

Por otro lado los peces silvestres tienen una microbiota que se relaciona más con la existente en el agua y se puede emplear como un indicador de contaminación ambiental (Klase et al., 2019). La ecología de los diferentes ambientes que habitan los peces favorece una microbiota muy variada, pero pueden tener funciones similares, por lo que un cambio o reducción de la microbiota no necesariamente puede desencadenar un problema de salud (Mougin & Joyce, 2023) (Fig. 2).



Figura 2. Reproductores de tilapia en estanques de concreto tipo raceway.

Consideraciones finales

El poder comprender y manipular la microbiota ha demostrado ser de gran utilidad para mejorar la condición de vida de los peces, como la nutrición, respuesta inmune y disminución de los problemas sanitarios, además de ser una alternativa amigable con el ambiente y que ayudaría a reducir la aplicación de productos como los químicos y antibióticos; los cuales ponen en riesgo la salud de los ecosistemas, incluyendo al ser humano.



Referencias

- Awad, E. y A. Awaad. 2017. Role of medicinal plants on growth performance and immune status in fish. *Fish & Shellfish Immunology* (67): 40-54.
- Begum, N., M.S. Islam, A.K.M.F. Haque y I.N. Suravi. 2017. Growth and yield of monosex tilapia *Oreochromis niloticus* in floating cages fed commercial diet supplemented with probiotics in freshwater pond, Sylhet. *Bangladesh Journal of Zoology* 45 (1): 27-36.
- Butt, R. L. y H. Volkoff. 2019. Gut microbiota and energy homeostasis in fish. *Frontiers in Endocrinology* (10): 9.
- Egerton, S., S. Culloty, J. Whooley, C. Stanton y R.P. Ross. 2018. The gut microbiota of marine fish. *Frontiers in Microbiology* (9): 863.
- Elsabagh, M., R. Mohamed, E.M. Moustafa, A. Hamza, F. Farrag, O. Decamp., M. Dawood y M. Eltholth. 2018. Assessing the impact of Bacillus strains mixture probiotic on water quality, growth performance, blood profile and intestinal morphology of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture Nutrition* 24 (6): 1613-1622.
- Guarner, F. 2007. Papel de la flora intestinal en la salud y en la enfermedad. *Nutrición Hospitalaria* (22): 14-19.
- Van Hai, N. 2015. Research findings from the use of probiotics in tilapia aquaculture: A review. *Fish & Shellfish Immunology* 45 (2): 592-597.
- Hlordzi, V., F.K. Kuebutornye, G. Afriyie, E.D. Abarike, Y. Lu, S. Chi y M.A. Anokyewaa. 2020. The use of Bacillus species in maintenance of water quality in aquaculture: A review. *Aquaculture Reports* (18): 100503.
- Johny, T. K., R.M. Puthusseri y S.G. Bhat. 2021. A primer on metagenomics and next-generation sequencing in fish gut microbiome research. *Aquaculture Research* 52 (10): 4574-4600.
- Kelly, C., e I. Salinas. 2017. Under Pressure: Interactions between Commensal Microbiota and the Teleost Immune System. *Frontiers in Immunology* (8): 559.
- Klase, G., S. Lee, S. Liang, J. Kim, Y.G. Zo y J. Lee. 2019. The microbiome and antibiotic resistance in integrated fishfarm water: Implications of environmental public health. *Science of The Total Environment* (649): 1491-1501.

- Kononova, S. V., D.V. Zinchenko, T.A. Muranova, N.A. Belova y A.I. Miroshnikov. 2019. Intestinal microbiota of salmonids and its changes upon introduction of soy proteins to fish feed. *Aquaculture International* 27 (2): 475-496.
- Mougin, J., y A. Joyce. 2023. Fish disease prevention via microbial dysbiosis-associated biomarkers in aquaculture. *Reviews in Aquaculture* 15 (2): 579-594.
- Nathanailides, C., M. Kolygas, K. Choremi, T. Mavraganis, E. Gouva, K. Vidalis y F. Athanassopoulou. 2021. Probiotics have the potential to significantly mitigate the environmental impact of freshwater fish farms. *Fishes* 6 (4): 76.
- Ortiz-Estrada, Á. M., M. Martínez-Porchas, L.R. Martínez-Córdova, F. Vargas-Albores, A. Burgos-Hernández, S.M. Scheuren-Acevedo y T. Gollas-Galván. 2021. Bacterial communities and predicted nitrogen metabolism of heterotrophic- and probiotic-based biofilms used for super-intensive indoor shrimp culture. *Aquaculture Research* 52 (1): 334-344.
- Pérez-Chabela, M. D. L., Y. Alvarez-Cisneros, J. Soriano-Santos y M. A. Pérez-Hernández. 2020. Los probióticos y sus metabolitos en la acuicultura. Una Revisión. *Hidrobiológica* 30 (1): 93-105.
- Ruiz, P., J.M. Vidal, D. Sepúlveda, C. Torres, G. Villouta, C. Carrasco, F. Aguilera, N. Ruiz-Tagley H. Urrutia. 2020. Overview and future perspectives of nitrifying bacteria on biofilters for recirculating aquaculture systems. *Reviews in Aquaculture* 12 (3): 1478-1494.
- Souza, D. C. D M., M.C. D. Santos y E.C. Chagas. 2019. Immune response of teleost fish to helminth parasite infection. *Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária* 28 (4): 533-547.
- Vargas-Albores, F., L.R. Martínez-Córdova, A. Hernández-Mendoza, F. Cicala, A. Lago-Lestón y M. Martínez-Porchas. 2021. Therapeutic modulation of fish gut microbiota, a feasible strategy for aquaculture? *Aquaculture* (544): 737050.
- Wang, A. R., C. Ran, E. Ringø y Z.G. Zhou. 2018. Progress in fish gastrointestinal microbiota research. *Reviews in Aquaculture* 10 (3): 626-640.
- Xavier, R., R. Severino y S.M. Silva. 2024. Signatures of dysbiosis in fish microbiomes in the context of aquaculture. *Reviews in Aquaculture* 16 (2): 706-731.

**Cita**

Gaitán-Morado, E.V., A. Luna-González. Peces, bacterias y microbiota. Recursos Naturales y Sociedad, 2025. Vol. 11 (1): 246-257.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0016>.

Sometido: 28 de noviembre de 2024

Aceptado: 09 de mayo de 2025

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

**Composting Canary Island date palm and water lily:
an alternative to reducing environmental and soil problems**

El compostaje de palma canaria y lirio acuático: alternativa para reducir problemas ambientales y de suelo

**Dionicio Alvarado-Rosales¹, Luz de Lourdes Saavedra-Romero²,
Sandra Fabiola Mares-Flores³, Óscar Mikhail Mares-Flores⁴,
Edgar Omar Rodríguez-Martínez⁵ y Jorge Alonso Maldonado-Alicona⁶**

Resumen

El compostaje de residuos de palma y lirio acuático es una alternativa para disminuir el volumen de residuos orgánicos. En la Ciudad de México se generaron alrededor de 15 mil metros cúbicos de desechos de palma entre 2022 y 2024, mientras que, las estadísticas del lirio se desconocen. Durante el proceso de compostaje, es vital el monitoreo de distintas variables y actividades de manejo, muchas de las cuales no se realizan en las plantas de compostaje de la CDMX. Previo al uso de compostas, es importante cumplir con los requerimientos establecidos en la NMX-AA-180-SCFI-2018. A través de la investigación científica, se pueden mejorar estas necesidades e impulsar la generación de nuevos productos para el sector agroindustrial, tales como fortificantes de nitrógeno, fosfocompostas, biofertilizantes, té de composta, etc. Además, recientemente se ha incrementado la atención a la mejora de la salud del suelo y la producción de cultivos, donde destaca la incorporación de compostas como una alternativa rentable y ecológica para mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

Palabras clave

Composta, salud de suelo, residuos orgánicos, biofertilizantes, usos de composta.

^{1,2} Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Programa de Fitosanidad-Fitopatología, km. 36.5 Carretera México- Texcoco, Montecillo, Texcoco, Estado de México.

^{3,4,5,6} Terra Mulch S.A. de C.V. Canal de Chalco s/n, Ciénega Grande, Alcaldía Xochimilco, Ciudad de México.

* Autor de correspondencia: E-mail: saavedra.luz@colpos.mx



Abstract

Composting of palm and water lily waste is an alternative for reducing the volume of organic waste. In Mexico City, around 15,000 cubic meters of palm waste was generated between 2022 and 2024, while statistics for water lily are unknown. During the composting process, monitoring of different variables and management activities is vital, many of which are not carried out in CDMX composting plants. Prior to using compost, it is important to comply with the parameters established in NMX-AA-180-SCFI-2018. Through scientific research, these needs can be improved, as well as the generation of new products for the agro-industrial sector, such as nitrogen fortifiers, phosphocompost, biofertilizers, compost tea and compost biofilters. In addition, there has recently been an increased focus on improving soil health and crop production, with the inclusion of compost being a cost-effective and environmentally friendly alternative to improve its physical, chemical and biological properties.

Keywords

Compost, soil health, biofertilizers, uses of compost, organic waste.

Introducción

Entre los problemas graves que enfrentan gobierno y habitantes, destaca la gran cantidad de residuos sólidos urbanos generados anualmente (41 M Ton), de los cuales 52.4 % corresponden a residuos orgánicos (residuos de comida, jardín y materiales orgánicos similares), según datos de la SEMARNAT (2012), sin embargo, en la Ciudad de México (CDMX), el volumen de residuos orgánicos ha ido en aumento por la muerte de las palmas atribuida a diversos agentes (Alvarado-Rosales *et al.*, 2024; Quezada-Salinas *et al.*, 2023); entre 2022 y 2024 se han derribado 1121 palmas canarias (*Phoenix canariensis* L.) lo que ha generado más de 15 mil metros cúbicos de desechos (Datos proporcionados por Autoridades del Vivero Neza, Dirección de Infraestructura Verde, 2025). Por otra parte, el lirio acuático (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) que afecta los canales de la Zona Chinampera y Parque Ecológico de Xochimilco, también contribuye al aumento del volumen de residuos. Esta planta, se encuentra entre las 100 más invasivas del mundo (Ramírez-Gerardo *et al.*, 2023). De acuerdo con la CONABIO (2023), prácticamente todos los lagos de México tienen problemas con la invasión del lirio; solo en el Lago de Chapala cubre 7,000 hectáreas. Con el propósito de reducir sus poblaciones, desde 2019, la biorrefinería LirMex III procesa 6,125 kg de lirio

acuático por semana (Martínez-Ruiz y Méndez-González, 2022), pero a ciencia cierta, se desconoce el volumen producido a nivel nacional. Otra gran preocupación, es la extracción desmedida de tierra de monte la cual ascendió a 144,015 Ton (SEMARNAT, 2016), lo que ha originado daños ecológicos irreversibles en muchos bosques templados del país (Fig. 1).



Figura 1. Problemas ambientales que el compostaje busca reducir: A) palmas canarias enfermas y muertas en distintos puntos de la Ciudad de México; B) biomasa acumulada de las palmas derribadas; C) explotación masiva de tierra de monte; D) pilas de lirio acuático que afecta los canales de Xochimilco y otros cuerpos lacustres.

La pérdida de salud de los suelos es otra inquietud mundial (Morin *et al.*, 2020), por lo que las naciones están conscientes de la necesidad de recuperar la salud de estos en aras de maximizar la producción de alimentos, en cantidad y calidad (Wright *et al.*, 2022).

En el ambiente urbano como en el forestal, las características físicas de los suelos afectan el crecimiento y la distribución de los árboles al influir en la capacidad de las raíces para acceder a los nutrientes y al agua (Morin *et al.*, 2020), mientras que las propiedades químicas y biológicas se relacionan con la nutrición y fertilidad (Amat *et al.*, 2020). Un suelo sano posee adecuada porosidad,



disponibilidad de nutrientes y contenido de materia orgánica que le permite respirar y absorber agua, baja compactación favoreciendo la penetración de raíces, mayor conductividad hidráulica y estabilidad de los agregados del suelo (Aggelides y Londra 2000; Pit *et al.*, 1999). Por otra parte, las características de un suelo deteriorado hacen referencia a pHs alcalinos, proclives a la erosión, con alto contenido de sales, compactos, bajos contenidos de materia orgánica, menor cantidad de carbono edáfico, comunidades microbianas, micro y macrofauna reducidas (Saha *et al.*, 2012). En este sentido, mejorar todas o algunas de las propiedades del suelo optimizarán su calidad y salud (Wright *et al.*, 2022).

En la búsqueda de soluciones a los problemas mencionados, la producción de composta utilizando residuos de palma canaria y lirio acuático, destaca como una alternativa amigable, por ello, en el presente, se aborda el monitoreo del proceso de compostaje de dichas materias primas, los requisitos previos al uso de compostas, casos sobre su uso en áreas verdes urbanas y algunos cultivos, y finalmente, se presentan las tendencias mundiales sobre la optimización de los factores que intervienen en el proceso de compostaje, el papel de las compostas en la salud del suelo y la valorización de nuevos productos a base de compostas.

El proceso de compostaje

El compostaje es el arte y la ciencia de la descomposición aeróbica de residuos orgánicos (residuos de poda, jardinería, malezas, paja, desechos ganaderos y avícolas, lodos de depuradoras, etc.) mediada por la actividad microbiana para crear como producto final, la composta. En la figura 2 se ilustran las principales fases del proceso, en cada una de las cuales se debe realizar un trabajo planificado para optimizar los factores que lo afectan, entre los que destacan, la naturaleza y tamaño de la materia prima, la tecnología de compostaje (en hileras, en pilas, etc.), duración del proceso, frecuencia de volteos, riego y cribado. Además de ser un recurso renovable, la composta es un producto estable, maduro e higiénico, con propiedades físicas, químicas y biológicas que contribuye a mejorar la estructura del suelo (porosidad, retención y uso eficiente del agua, alto contenido de materia orgánica, etc.) y a suprimir enfermedades con origen en el suelo.



Figura 2. Proceso de compostaje. A) triturado de residuos de palma canaria; B) conformación de pilas de compostaje; C) volteo mecanizado y riego; D) pilas de composta madura.

Requisitos de uso

En el diagnóstico realizado por Velasco *et al.* (2016) en siete plantas de compostaje en la CDMX, destacan distintos errores de operación, siendo los más relevantes, la inadecuada separación y clasificación de residuos (mezcla de residuos orgánicos e inorgánicos), falta de riego (que ha contribuido a incendios), incorrecta aireación (por la carencia de volteos continuos) y falta de monitoreo (temperatura y humedad). Subsanando esto, en conjunto con la empresa Terra Mulch, se realizó el compostaje de palma canaria y en mezcla con lirio acuático. El cuadro 1 muestra los requerimientos de una composta terminada según la Norma Mexicana (NMX-AA-180-SCFI-2018) (COTEMARNAT, 2018), y los valores promedio para la composta de palma canaria (100%) y en mezcla con lirio acuático (50:50); los valores obtenidos las hacen recomendables para ser empleadas con diversos fines y en mezclas con otros materiales. La utilización de una composta inestable e inmadura tendrá repercusiones sobre el crecimiento de las plantas (inhibición y muerte de las mismas), y en ocasiones, en la salud de la población.



Entre las pruebas biológicas que se utilizan a nivel mundial para monitorear el proceso de compostaje, destaca el Índice de Germinación (IG). La implementación de bioensayos de fitotoxicidad son una herramienta invaluable para determinar la madurez en compostas. Zucconi et al. (1981), propuso por vez primera el índice mencionado, el cual incorpora los efectos que tienen las sustancias fitotóxicas presentes en las compostas sobre las tasas de germinación y elongación radicular empleando semillas de especies de rápido crecimiento como lechuga (*Lactuca sativa* L.), rábano (*Raphanus sativus* L.), berro (*Lepidium sativum* L.), etc., (Kong et al., 2023). El IG tiene el potencial de reflejar la fitotoxicidad de una composta, con la ventaja de un tiempo de medición corto, asequible y de bajo costo; en la figura 3 se reflejan estas bondades en bioensayos con extractos de composta de palma canaria estable y madura donde se obtuvieron IGs acorde a la Norma Mexicana.

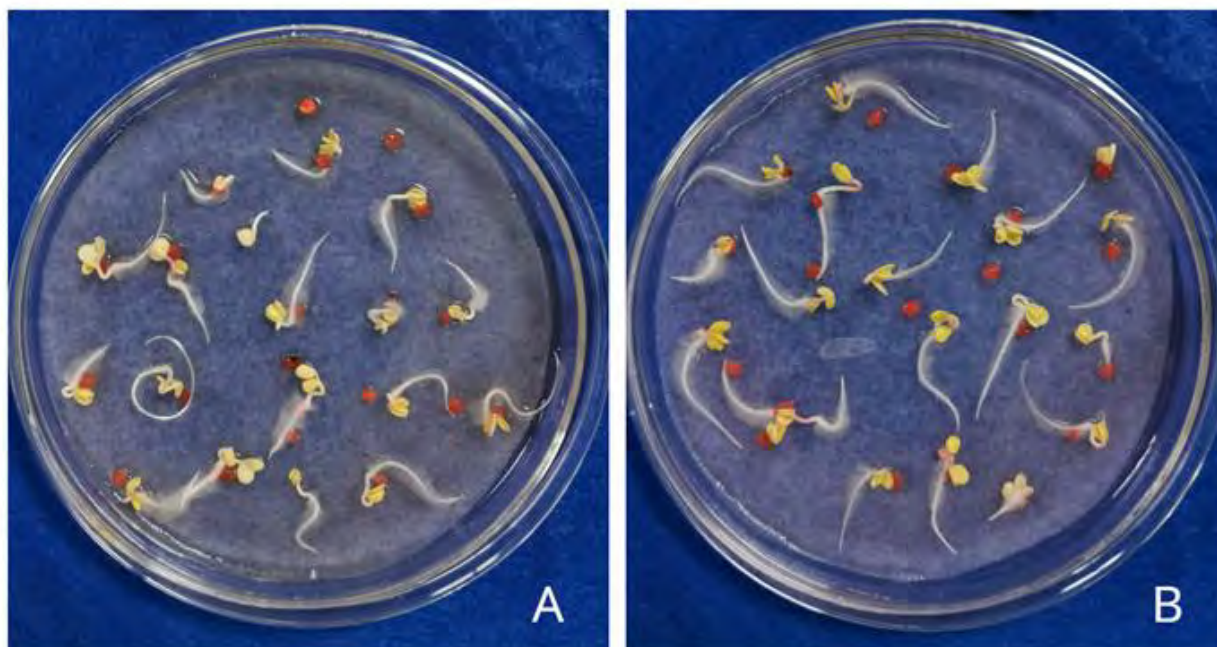


Figura 3. Bioensayos de fitotoxicidad con extractos de composta de palma canaria. A. cámara de germinación con rábano rojo largo 48 h después de la siembra en extracto de composta. B. en agua destilada (testigo).

Casos del uso de compostas

Entre los diversos usos de las compostas, resaltan: los acolchados, como abono en huertos y jardines, en semilleros, en macetas, en la producción de plantas en invernadero, en la producción de pasto, en la creación de jardines instantáneos, producción de granos, frutos y hortalizas, en la remediación de suelos contaminados (p. ej., terrenos baldíos, escombros de minas), cobertura de

rellenos sanitarios, como té de composta (solución obtenida de la fermentación aeróbica de composta en agua) (Ingham, 2005), en la supresión de enfermedades como la secadera por *Pythium ultimum* (Ebrahimi *et al.*, 2018), etc. Recuerde, la composta "perfecta", estará en función del propósito específico de su uso.

Actualmente, compostas maduras y estables se están utilizando con diversos fines en áreas verdes de la CDMX, en la producción de planta en invernadero, y recientemente, en la producción de nopal verdura (Fig. 4).



Figura 4. Usos de las compostas en diferentes especies vegetales y sitios de la Ciudad de México. A) palma; B) betabel; C) calabaza; D) agave; E) nopal; F) árbol de las manitas.

Con el fin de impulsar la producción y uso de compostas de calidad, empresas como Terra Mulch, han patrocinado proyectos de investigación para producir compostas de calidad con residuos de palma canaria y jacinto de agua, entre otros materiales, en la búsqueda de resarcir las deficiencias mencionadas previamente, a través del monitoreo continuo y análisis de laboratorio, en coordinación con un equipo de investigación. En este sentido, a partir de 2022, se ha monitoreado mensualmente el proceso de compostaje, a base de diversos residuos, empleando diversas pruebas físicas, químicas y biológicas (Cuadro 1). La meta es cubrir diversas posibilidades de uso: en cultivos



agrícolas tanto intensivos como extensivos, en cultivos forestales, en repoblaciones forestales, en jardinería urbana, en campos de golf y producción de tepes (trozo de césped y suelo que se mantiene unido por los estolones), como componente de sustrato en viveros hortícolas, en viveros forestales y ornamentales.

Cuadro 1. Especificaciones para una composta terminada de acuerdo con la Norma Mexicana, NMX-AA-180-SCFI-2018 (COTEMARNAT, 2018) y valores promedio de composta de palma canaria y palma-lirio (50:50) producidas por Terra Mulch, S.A. de C.V.

Variable	Especificación según NMX-AA-180-SCFI-2018	Palma (100%)	Palma + Lirio acuático (50/50)
Granulometría	Composta Tipo 1: ≤ 10 mm	Tipo 1= 89.27%	Tipo 1= (89.14%
	Composta Tipo 2 y 3: $10 \leq 30$ mm	Tipo 2 y 3= 10.73%	Tipo 2 y 3= 10.86%
Humedad	25 a 45% en peso	29.8- 32.3%	35.25 - 41.3%
Índice de germinación	$\geq 80\%$	135	105
pH	6.5-8.5	7.57	8.24
Conductividad Eléctrica (CE)	0.5-12 dS m ⁻¹	3.93	3.73
Materia orgánica (MO)	$\geq 20\%$	34.12	24.31
Carbono orgánico total	Mínimo 10%*	19.79	14.10
Nitrógeno total (Nt)	1-3%	1.71	1.21
Relación C/N	15-25	11.57	11.65
Fósforo (P)	1-3 %	0.015%	0.02%
Potasio (K)	1-3%	0.52%	0.59%

Tendencias en el compostaje, salud del suelo y valorización de productos

Para nuestro país, al igual que el resto de Latinoamérica, se debe continuar en la optimización de los factores que afectan el proceso de compostaje empleando diferentes materias primas y no sólo para los materiales aquí tratados, incluida la relación C/N, temperatura, contenido de humedad, disponibilidad de oxígeno, microorganismos y tecnología para el composteo. Actualmente, en otros países se están incorporando microorganismos para acortar el tiempo de compostaje, mejorar la madurez de la composta y su calidad (Zohu *et al.*, 2022).

A pesar de su potencial como fuente sostenible de nutrientes y materia orgánica, los residuos orgánicos a menudo son depositados en rellenos sanitarios, en lugar de transformarlo en un producto con alto valor agregado. Al respecto, en la revisión realizada por Brichi *et al.* (2023),

examinan el estado actual de la aplicación de residuos orgánicos en sistemas agrícolas, el análisis de las tendencias y los resultados de las investigaciones publicadas, con énfasis en el mejoramiento de la salud de suelo y productividad de cultivos. Entre los 81 artículos revisados, los residuos de mayor uso fueron: composta orgánica (46,9%), estiércol de ganado (32,1%), residuos de cultivos (residuos de cosecha, abonos verdes y residuos de poda de árboles; 17,3%), residuos sólidos urbanos (16,1%) y el biocarbón (16,1%). También se menciona, que variables como el pH (78%), la densidad aparente (40%) y la materia orgánica/carbono orgánico total (79%) fueron, los indicadores químicos, físicos y biológicos evaluados con mayor frecuencia en este tipo de residuos para determinar la calidad de los suelos y su salud, lo cual coincide con los estudios de Bünemann *et al.* (2018).

Una tendencia mundial, apoyada en investigación, es la valorización de la composta a través del desarrollo de productos agroindustriales, fortificantes de nitrógeno, fosfocomposta, biofertilizantes, té de composta y biofiltros (Sharma 2024), así como la investigación exhaustiva sobre el potencial de los biofertilizantes bacterianos, cianobacterianos y fúngicos para diversos cultivos. Su aplicación ha demostrado tener efectos positivos en la fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos.

Además de mejorar la disponibilidad de nutrientes, estos microorganismos contribuyen al crecimiento de las plantas mediante la producción de hormonas, la inducción de resistencia al estrés y control de fitopatógenos (Ahmed *et al.*, 2023). Además, los biofertilizantes a base de compost no sólo inciden positivamente en la fertilidad del suelo, sino que también mantienen su seguridad de uso, debido a su naturaleza ecológica.

Referencias

- Aggelides, S.M. and Londra, P.A. 2000. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay Soil. *Bioresource Technology*, 71, 253-259. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00074-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00074-7)
- Alvarado-Rosales, D., Saavedra Romero, L. de L., Quezada-Salinas, A., Almaraz-Sánchez, A., García-Díaz, S. E., Aranda-Ocampo, S., Ortiz-García, C. F., Equihua-Martínez, A. y López-Buenfil, J. A. 2024. La muerte de las palmas canarias en la Ciudad de México. *Gaceta SECTEI, Con-Ciencia y Educación* 3:10-11.



- Ahmed, T., M. Noman, Y. Qi, M. Shahid, S. Hussain, H.A. Masood, L. Xu, H.M. Ali, S. Negm, A.F. El-Kott. 2023. Fertilization of microbial composts: A technology for improving stress resilience in plants. *Plants* 12: 3550. <https://doi.org/10.3390/plants12203550>
- Amat, D., J.K. Thakur, A. Mandal, A.K. Patra, K. Kiran y K. Reddy. 2020. Microbial indicators of soils health: Conventional to modern approaches. In: Sharma, S.K., U.B. Sinhg, P.K. Sahu, H.V. Singh, P.K. Sharma (eds.). *Rhizosphere microbes, Soil and plant functions. Microorganisms for Sustainable* 23. Springer. pp. 213-233.
- Brichi, L., J.V.M. Fernandes, B.M. Silva, J.D.F. Junior y M.R. Cherubin. 2023. Organic residues and their impact on soil health, crop production and sustainable agriculture: A review including bibliographic analysis. *Soil Use and Management*, 39, 686–706. <https://doi.org/10.1111/sum.12892>
- Bünemann, E. K., G. Bongiorno, Z. Bai, R.E. Creamer, G. De Deyn, R. de Goede, L. Fleskens, V. Geissen, T.W. Kuyper, P. Mäder, M. Pulleman, W. Sukkel, J.W. van Groenigen y L. Brussaard. 2018. Soil quality –A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120: 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- CONABIO. 2023. Información sobre especies invasoras en el Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. <https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/Invasoras>
- COTEMARNAT [Comité Técnico de Normalización Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales]. 2018. Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018, qué establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales. COTEMARNAT. 52 p.
- Ebrahimi, E., Werren, D., and Niemsdorff, P.V. 2018. Suppressive effects of compost from residual biomass on *Pythium ultimum*. *Journal of Plant Diseases and Protection New Series*, 125(5), <https://doi.org/10.1007/s41348-018-0163-7>
- Ingham, E. 2005. The compost tea brewing manual. Latest methods and research. 5th edition. Soil Foodweb Incorporated, Oregon.
- Kong, Y., J. Zhang, Y. Yang, Y. Liu, L. Zhang, G. Wang, G. Liu, R. Dang, G. Li y J. Yuan. 2023. Determining the extraction conditions and phytotoxicity threshold for compost maturity evaluation using the seed germination index method. *Waste Management* 171: 502-511. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.09.040>

- Martínez-Ruiz, J.A., Méndez-González, J.F. 2022. Biorrefinería: control y aprovechamiento del lirio acuático. *Ciencia* 73(2), 79-84.
- Morin, R.S. (Comp.). 2011. Forest Ecosystems Health Indicators. United States Department of Agriculture FS-1151. 28 p.
- Pit, R.E., Lantrip, J., Harrison, R., et al. 1999. Infiltration through Disturbed Urban Soils and Compost-Amended Soil Effects on Runoff Quality and Quantity. USEPA, Cincinnati, OH.
- Quezada-Salinas, A., García-Díaz, S.E., Almaraz-Sánchez, A., Alvarado-Rosales, D., Saaavedra-Romero, L. de L., Aranda-Ocampo, S., Ortiz-García, F., Equihua-Martínez, A. 2023. Fungi associated with the decline and death of *Phoenix canariensis* in Mexico City. *Mexican Journal of Phytopathology*, 41(2) 241-256.
- Ramírez-Gerardo, M.G., Ibáñez-Ocampo, L., Arévalo-Galindo, J.L., Vásquez-González, G. 2023. Jacinto de agua (*Eichhornia crassiper* (Mart.) Solms) como sustrato germinativo y abono orgánico para hortalizas. *Nova Scientia*, 15(31), 1-12. <https://doi.org/10.21640/ns.v15i31.3110>
- Saha, R., Chaudhary, R.S., Somasundaram, J. 2012. Soil health management under hill agroecosystem of North East India. *Appl Environ Soil Sci* 2012: 1687-7667.
- SEMARNAT. 2016. Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2016. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 24 p.
- SEMARNAT. 2012. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012.
- Sharma, A., Soni, R. & Soni, S.K. 2024. From waste to wealth: exploring modern composting innovations and compost valorization. *J Mater Cycles Waste Manag* 26, 20-48. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01839-w>
- Velasco, E., Lima, M., Zavaleta, H., Vázquez, A., Espinosa-Valdemar, R. y Álvarez- Zeferino, J. 2016. Operación de siete plantas de composta en la Ciudad de México. En: Los residuos sólidos como fuente de materiales y energía. Compiladores: Benitez, O. S., Ojeda, B., Taboada-González, P.A., Quetzalli-Aguilar, V., Cruz-Sotelo, S.E. y Nakasima-López, M. (Compiladores). Encuentro de expertos en residuos solidos, año 9, No. 1, Octubre 2015- Octubre 2016. Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Aplicada a Residuos Sólidos, A.C. 2016 ISSN 2395-8170 Vol 9, Num. 13, 244-252.



- Wright, J., Kenner, S. and Lingwall, B. 2022. Utilization of compost as a soil amendment to increase soil health and to improve crop yields. *Open Journal of Soil Science*, 12, 216-224. <https://doi.org/10.4236/ojss.2022.126009>.
- Zhou, Y., Xiao, R., Klammsteiner, T., Kong, X., Yan, B., Mihai, F.C., Awasthi, M.K. 2022. Recent trends and advances in composting and vermicomposting technologies: a review. *Bioresour Technol* 360:127591
- Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., de Bertoldi, M. 1981. Evaluating toxicity in immature compost. *Biocycle* 22, 54–57.

Cita

Alvarado-Rosales, D., L.L. Saavedra-Romero, S. Fabiola Mares-Flores, O.M. Mares-Flores, E.O. Rodríguez-Martínez, J.A. Maldonado-Alicona. El compostaje de palma canaria y lirio acuático: alternativa para reducir problemas ambientales y de suelo. *Recursos Naturales y Sociedad*, 2025. Vol. 11 (1): 259-270. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0017>

Sometido: 20 de septiembre de 2024

Aceptado: 7 de mayo de 2025

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

Small vaccines, large wings

Vacunas pequeñas, alas grandes

Hassian León¹ y Carlos Angulo^{1*}

Resumen

Las aves de corral son aves domésticas de las cuales se obtienen deliciosos alimentos. No obstante, las aves domésticas pueden transmitir enfermedades que afectan tanto a otros animales como a los seres humanos y al ecosistema. Por eso, nuevas estrategias se han generado para prevenir las enfermedades en los seres humanos y que tengan un origen en las aves de corral, por ejemplo, el uso de vacunas diminutas. Pero, *¿qué es una vacuna diminuta?* Una vacuna diminuta es aquella que utiliza un pequeño material conocido como nanopartícula. Y, *¿qué es una nanopartícula?* Una nanopartícula es un material orgánico o inorgánico más pequeño que 100 nanómetros, capaz de encapsular y proteger la vacuna, generando nanovacunas. Entonces, *¿cómo protegen las nanovacunas a las aves?* Estas y otras preguntas se responderán más a fondo en el texto de manera sencilla de comprender para todos los lectores.

Palabras clave

Nanotecnología, salud, patógenos, producción avícola.

¹Grupo de Inmunología y Vacunología. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR), Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, La Paz B.C.S. 23096, México.

* Autor de correspondencia: E-mail: angulo@cibnor.mx

Abstract

Poultry are domesticated birds from which delicious foods are obtained. However, domestic birds can transmit diseases that affect not only other animals but also humans and the ecosystem. Therefore, new strategies have been developed to prevent diseases in humans caused by poultry, such as the use of tiny vaccines. But what is a tiny vaccine? A tiny vaccine is one that uses a small material known as a nanoparticle. And what is a nanoparticle? A nanoparticle is an organic or inorganic material smaller than 100 nanometers, capable of encapsulating and protecting the vaccine, creating nanovaccines. So, how do nanovaccines protect birds? These and other questions will be answered more thoroughly in the text in a way that is easy for all readers to understand.

Keywords

Nanotechnology, health, pathogens, poultry production.

Introducción

¿Qué son las aves de corral? Las aves de corral son aves domésticas, como los pollos y las gallinas, criadas para la obtención de alimentos deliciosos como los huevos fritos que desayunas o los jugosos muslos de carne rostizados (FAO, 2024). A pesar de que estos alimentos son saludables y nutritivos, el uso de aves de corral ha provocado la propagación de enfermedades zoonóticas.

Pero, *¿qué es una enfermedad zoonótica?* Una enfermedad zoonótica es aquella que se transmite de los animales a los humanos, en este caso, de las aves de corral a los humanos (Pohjola et al., 2016). Y, *¿Qué enfermedades zoonóticas afectan a las aves de corral?* Las principales enfermedades de aves de corral causadas por bacterias son la salmonelosis, la colibacilosis y el cólera aviar; mientras que las enfermedades por virus incluyen la influenza aviar (AIV), la enfermedad de Newcastle (NDV) y la bronquitis infecciosa viral (IBV) (Schat, 2014). Por lo tanto, se han buscado alternativas para prevenir estas enfermedades.

En la actualidad se han generado nuevas estrategias para prevenir las enfermedades zoonóticas provocadas por las aves de corral, por ejemplo, el uso de vacunas diminutas (Angulo & León, 2024). Pero, *¿a qué se refiere una vacuna diminuta?* Una vacuna diminuta es aquella que utiliza un material pequeño denominado nanopartícula. Y, *¿Qué es una nanopartícula?* Una nanopartícula es un material con un tamaño menor a 100 nanómetros. Para entender la magnitud de tal unidad de

medida imaginemos dividir un milímetro en un millón de partes iguales, cada una de esas partes es un nanómetro. En comparación, un cabello humano tiene un diámetro aproximado de 100,000 nanómetros, y más o menos mide lo mismo el grosor de una hoja de papel.

Las nanopartículas pueden crearse utilizando diversos tipos de materiales, ya sean orgánicos como azúcares, proteínas y grasas, o inorgánicos como metales (Gill, 2013; Shrestha *et al.*, 2018; El-Ghany, 2019; Poddar & Kishore, 2022). De manera común, las nanopartículas de zinc o titanio las podemos encontrar en protectores solares, cosméticos y pinturas. En la actualidad, los investigadores también utilizan las nanopartículas para transportar una vacuna y estimular la respuesta del sistema inmune efectiva que permita proteger de enfermedades a los animales y personas (Angulo *et al.*, 2022). Por lo tanto, las nanopartículas han sido utilizadas para la generación de nanovacunas contra las enfermedades zoonóticas que afectan a las aves de corral.

En las siguientes secciones del artículo se describirá con más detalle qué son las nanovacunas y su efecto para combatir enfermedades en las aves de corral.

Antecedentes

Aves de corral y sus enfermedades

Un desayuno satisfactorio puede incluir huevos estrellados o revueltos, según el gusto personal. Lo que no varía es que estos alimentos provienen de aves de corral. Las aves de corral son especies de aves que se crían para obtener alimentos deliciosos como huevos y carne, además de productos como las plumas de las aves (FAO, 2024). Dentro de las aves de corral se incluyen especies como patos, gansos y pavos, pero los pollos y las gallinas de postura son los más utilizados en la industria avícola (FAO, 2013). Los pollos y gallinas utilizados representan el 90 y 93% de la producción mundial de carne y huevos, respectivamente (FAO, 2024). Aunque los alimentos obtenidos de la industria avícola son saludables y nutritivos, el uso de aves de corral ha contribuido a la propagación de enfermedades zoonóticas.

Como se escribió anteriormente, una enfermedad zoonótica se transmite de animales a humanos; en este caso, de las aves de corral a las personas. Pero, *¿Cómo se transmiten las enfermedades zoonóticas a las personas?* Según la Organización Mundial de La Salud (2023), las enfermedades zoonóticas pueden transmitirse a través del contacto con aves infectadas y su estiércol, así como

por la inhalación e ingestión del polvo generado en el gallinero. También pueden propagarse mediante la contaminación cruzada de agua y alimentos, así como por la ingesta de alimentos crudos de origen avícola.

Y, ¿*Cuáles enfermedades zoonóticas afectan a las aves de corral?* Entre las enfermedades zoonóticas bacterianas más destacadas de las aves se encuentran la salmonelosis, la colibacilosis y el cólera aviar (Schat, 2014; Xu et al., 2023). En cuanto a las enfermedades virales, estas incluyen el virus de la influenza aviar (AIV), el virus de la gripe de Newcastle (NDV) y el virus de la bronquitis gripal (IBV) (Schat, 2014) (Fig. 1). Los pollos enfermos muestran diversos signos clínicos como trastornos respiratorios, diarrea, parálisis y hasta la muerte, resultando en pérdidas de producción y financieras para la industria avícola (Haez & Attia, 2020). Por ejemplo, solo en Estados Unidos en el año 2020, se sacrificaron 40 millones de gallinas debido a un brote del virus de la influenza aviar, lo que resultó en una pérdida económica estimada entre 2.5 y 3 mil millones de dólares (54 mil millones de pesos) (Eurogroup For Animals, 2024). Esta cantidad dinero es comparable al presupuesto que se utilizará en el programa atención a la salud en México para el 2025 (EL FINANCIERO, 8 julio de 2024). Por consiguiente, opciones preventivas a enfermedades zoonóticas se han explorado para aves de corral; una de ellas es el uso de nanopartículas en las vacunas.

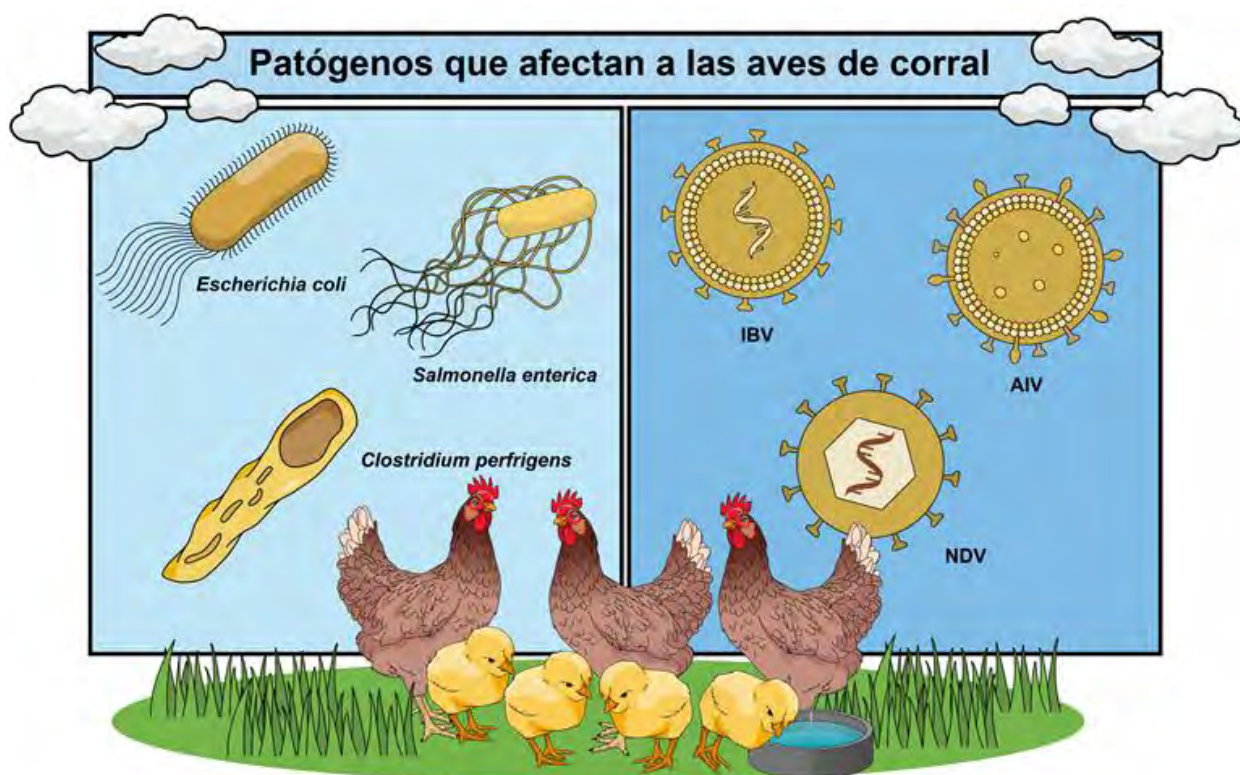


Figura 1. Principales enfermedades zoonóticas afectan a las aves de corral.

Nanopartículas y sus nanomateriales

Hoy en día estamos rodeados de nanopartículas, como las que se encuentran en productos cosmetológicos e incluso en alimentos en donde proporcionan sabor o actúan como conservadores. Además, las nanopartículas son utilizadas en medicina para generar vacunas, ya que les proporcionan protección y facilitan su reconocimiento por el cuerpo para estimular una respuesta inmune más eficaz. En este sentido, las nanopartículas son materiales pequeños que para ser consideradas “nanopartículas” deben de cumplir ciertas características: (1) un tamaño entre 1-100 nanómetros, (2) una carga superficial positiva o negativa, (3) una morfología (esférica, ovoide, tubular, etc.) y (4) ser biocompatible, es decir, que sea compatible con el cuerpo al que se aplicará (El-Ghany *et al.*, 2021). Las características y propiedades de las nanopartículas son brindadas por los nanomateriales utilizados.

Y, ¿Qué nanomateriales son utilizados para fabricación de nanopartículas? Los principales nanomateriales utilizados para la generación de nanopartículas son: (1) El quitosano, un polímero (cadena de un solo compuesto [eslabón]) de azúcares, como si se tratara de una bufanda de entrelazado de hilos de lana, donde cada hilo individual es una molécula de azúcar (Chandrasekar *et al.*, 2023). (2) El ácido poliláctico-co-glicólico (PLGA), un copolímero biodegradable compuesto de ácido poliláctico y ácido poliglicólico, como si fuera un entrelazo de costura, pero compuesta de dos hilos diferentes (Hasseb *et al.*, 2022). (3) Las partículas similares a virus (VLP) son estructuras de proteínas virales recombinantes que carecen de la genética viral en su interior. Las proteínas recombinantes se producen en un organismo que ha sido sujeto a modificación genética para insertarle un gen de otra especie para que así fabrique esa proteína, por lo tanto, podríamos decir que la VLP se asemeja a un huevo sin yema y clara, sólo conservando su cáscara hueca para poder insertar una vacuna (Xu *et al.*, 2018; El-Husseiny *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021). Por último, (4) el polianhídrido es un copolímero construido mediante uniones de compuestos metilvinilo y anhídrido maleico que para lograrse unir pierden agua, es decir, se forma algo similar a un panal de abejas que tiene celdas hexagonales de tamaño nano. Desde luego, en lugar de miel se colocaría la vacuna (Karandikar *et al.*, 2017). El quitosano, PLGA, VLP y polianhídrido son utilizados para generar nanopartículas biocompatibles y protectoras para nanovacunas administradas a aves de corral (Fig. 2).

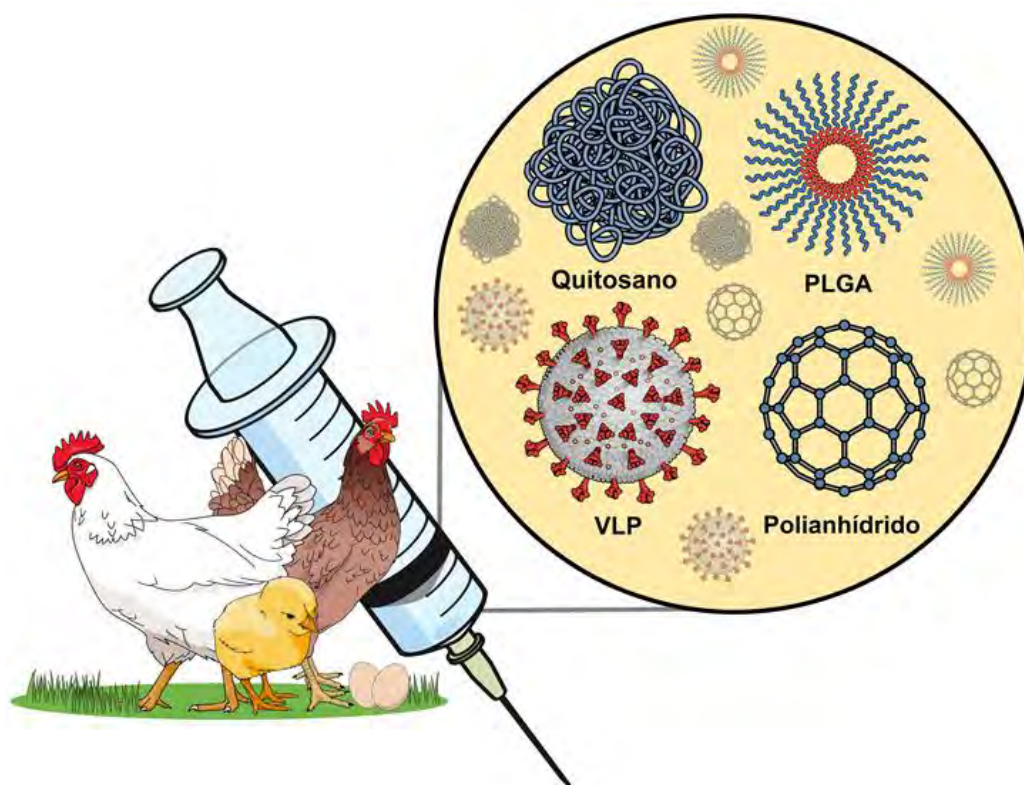


Figura 2. Nanomateriales utilizados para fabricación de nanopartículas.

Nanovacunas para aves de corral

¿Qué es una vacuna? Un patógeno muerto, inactivado o partes de él (antígenos) que se administra mediante la vacunación para generar una respuesta inmune protectora. En otras palabras, una vacuna es detectada por el cuerpo como si fuera un patógeno, pero sin causar la enfermedad, y al hacerlo, se induce en el cuerpo una respuesta que protegerá de la enfermedad real. Ahora bien, *¿Qué son las nanovacunas?* Las nanovacunas son vacunas diminutas fabricadas comúnmente con un antígeno (parte de un patógeno) que se encapsula o se une a la superficie de nanopartículas. En este caso, las nanopartículas actúan como transportadores y potenciadores (adyuvantes) de la respuesta inmunológica del cuerpo. Las nanovacunas son como directores de orquesta, los cuales guían al antígeno hacia la célula objetivo para provocar una respuesta inmune armoniosa y poderosa que proteja de enfermedades. Pero, *¿Cómo interactúan las nanovacunas con el sistema inmune?* Una vez que la nanovacuna es administrada al cuerpo, ésta es detectada por las células del sistema inmune que se encuentran patrullando como policías en busca de amenazas para neutralizarlas. Existen células especiales capaces de 'comerse' a las nanovacunas como si fueran bocadillos y los productos de la digestión son compartidos a otras células del sistema inmune para su reconocimiento. Es decir, una vez que la célula presentadora se “come” a la nanovacuna, la digiere y el antígeno se convierte en pequeños fragmentos que son reconocidos por otras células. Las

células que reconocen estas muestras se conocen como células B y células T. Las células B que reconocen estos fragmentos de antígenos producen anticuerpos para proteger al cuerpo; mientras que las células T que reconocen los fragmentos pueden actuar como colaboradoras (CD4+) de las células B, o generar compuestos tóxicos para los patógenos (CD8+) (Fig. 3) (Tizard, 2009).

Ahora, contra enfermedades que afectan a las aves de corral ¿Qué nanovacunas se han desarrollado? Por ejemplo, una nanovacuna de quitosano encapsuló ADN circular que produce una proteína llamada nucleocápside (N) del virus de la bronquitis infecciosa viral (CS@IBV). Esta nanovacuna se administró en pollos de la raza Leghorn por vía intranasal. Los pollos vacunados produjeron anticuerpos y multiplicaron sus células del sistema inmune (T CD4+ y CD8+) contra el virus, lo que provocó una disminución de la carga viral en la tráquea de los pollos infectados (Chandrasekar *et al.*, 2023). En otro estudio, el virus de Newcastle (inactivado) fue encapsulado en nanopartículas de PLGA (PLGA@iNDV). Esta nanovacuna se aplicó en pollos Leghorn por la vía intramuscular. La nanovacuna PLGA@iNDV estimuló en los pollos la producción de anticuerpos específicos contra el virus y fueron protegidos al 100% de la enfermedad viral de Newcastle (Kumar *et al.*, 2023). Además, una nanovacuna de VLP se construyó con las proteínas ND-F [proteína de fusión] y (HN [hemaglutinina-neuramidasa] del virus del Newcastle (VLP@ND-FN/HN). Para producir esta nanovacuna se utilizaron plantas de tabaco como biofábricas. La nanovacuna VLP@ND-FN/HN se inyectó en pollos Leghorn, quienes produjeron anticuerpos específicos contra el virus de Newcastle (Smith *et al.*, 2023). El último ejemplo es una nanovacuna desarrollada utilizando nanopartículas de polianhídrido. En el interior de estas nanopartículas se encapsularon proteínas de membrana de *Salmonella*. Después, las nanopartículas fueron recubiertas con la proteína flagelina de *Salmonella*. Esto permitió la generación de la nanovacuna PNP@OMP/F que fue aplicada de forma oral en pollos Leghorn. Los animales vacunados produjeron anticuerpos específicos en el suero sanguíneo y la mucosa intestinal, multiplicaron sus células del sistema inmune para defenderse (T CD4+ y CD8+) y una sustancia, llamada citocina Interferón gamma (IFN- γ), que ayuda a la multiplicación y comunicación en células inmunes (Renu *et al.*, 2018). Todos los estudios descritos demuestran que las nanovacunas diseñadas tuvieron resultados prometedores para prevenir y combatir las enfermedades infecciosas que afectan la producción y salud de aves de corral (Fig. 3).

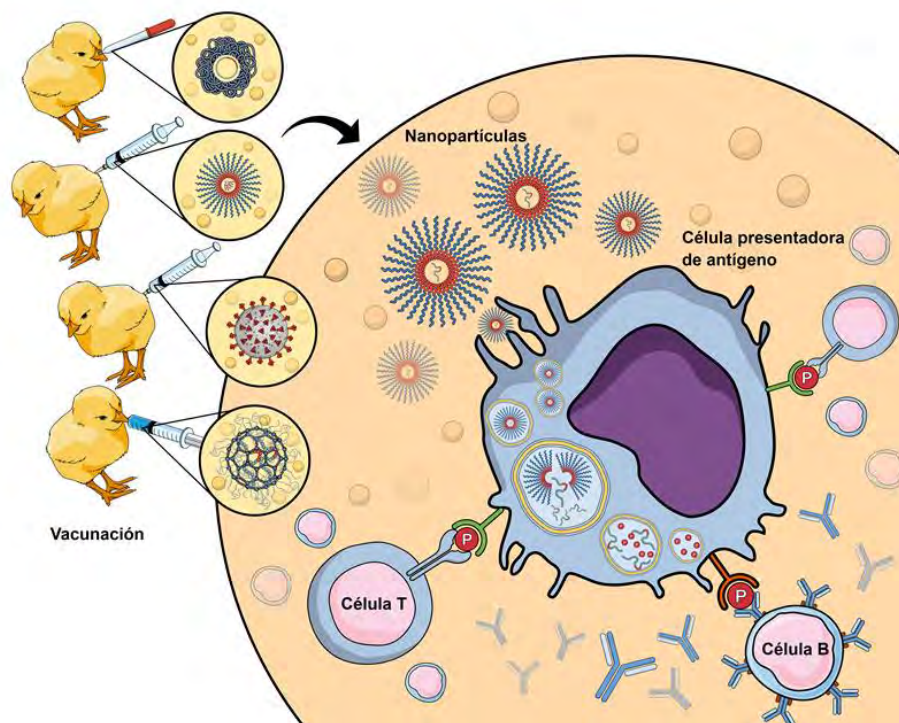


Figura 3. Mecanismo de acción de las nanovacunas con el sistema inmune.

Y, ¿Cuántas nanovacunas se han diseñado? En los últimos cinco años (2018-2023), la literatura científica reporta que 38 nanovacunas se han diseñado contra bacterias y virus que afectan a las aves de corral. De ellas, 14 están basadas en quitosano, 7 en PLGA, 15 en VLP y sólo 2 en polianhídrido (Fig. 4).

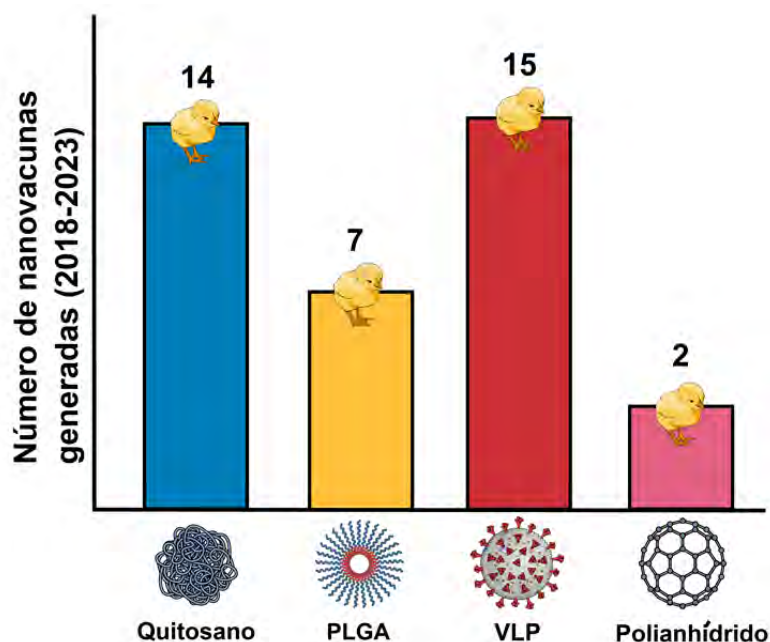


Figura 4. Número de nanovacunas diseñadas para aves de corral (2018-2023).

Discusión académica, consideraciones finales y perspectivas

Aunque los resultados de las nanovacunas evaluadas son prometedores, aún hay aspectos que deben mejorarse. Es como si las nanovacunas fueran prototipos de autos nuevos, que muestran buen rendimiento y prometen ser confiables, pero que todavía requieren ajustes para alcanzar su máximo potencial.

¿Cuáles son los principales desafíos en la producción de nanovacunas? Los principales desafíos de las nanovacunas se encuentran en su capacidad de conferir protección a una determinada enfermedad, bioseguridad, dirección al sitio de acción, así como reducir los costos de producción, almacenamiento y administración (Desai *et al.*, 2012). A continuación, se describirán algunos desafíos encontrados en las nanovacunas de quitosano, PLGA, VLP y polianhídrido, así como posibles soluciones para abordar los problemas.

Las nanovacunas de quitosano cuenta con desafíos como su mala solubilidad en agua, su capacidad de llegar al órgano objetivo y sus ciertos efectos tóxicos (Yadav *et al.*, 2023). Para estos problemas, se han propuesto esfuerzos para mejorar la solubilidad del quitosano con una solución más alcalina ($\text{pH} > 7$) que el agua ($\text{pH} = 7$) y bajas temperaturas durante su producción (Li *et al.*, 2024). La unión del quitosano a la célula objetivo se mejorará mediante modificaciones en su superficie con moléculas orgánicas como grasas, favoreciendo su adhesión en las mucosas (Angulo *et al.*, 2022). Además, la toxicidad es un punto crítico que podría resolverse utilizando nanocompuestos con diferentes materiales que hayan favorecido un aumento en la producción y diferenciación celular en lugar de causar la muerte celular (Shamekhi *et al.*, 2019; Tamburaci *et al.*, 2019; Prakash *et al.*, 2020; Yadav *et al.*, 2023).

En las nanovacunas de PLGA, su corta vida y unión no específica a los tejidos objetivo representan retos en su uso (Bose *et al.*, 2016). Para resolver esto, se han añadido grasas que pueden mezclarse con el agua (hidrófilas) a la superficie de las nanopartículas para cambiar sus propiedades fisicoquímicas y dirigir las a los tejidos objetivos, aumentando su vida media, efecto potenciador y capacidad de entrar por la membrana celular (Clawson *et al.*, 2011; Bose *et al.*, 2016).

Las nanovacunas de VLP presentan problemas en su estabilidad a altas temperaturas, purificación y almacenamiento. En primer lugar, la termo-estabilidad de las VLP se puede mejorar añadiendo mutaciones estabilizadoras dentro del antígeno, que pueden realizarse durante el diseño del mismo

(Marsian *et al.*, 2017). En segundo lugar, la cantidad de antígeno producido se puede mejorar con la adición de una proteína que funcione como guía (péptido señal), influyendo en la síntesis y purificación de las VLP (Zhang *et al.*, 2011). Por último, las nanovacunas basadas en VLP se pueden recuperar por métodos alternativos a la centrifugación que incluyen precipitación, ultrafiltración y cromatografía para mejorar la eficiencia de purificación de nanopartículas (Peixoto *et al.*, 2007; Dai *et al.*, 2018).

En el caso de las nanovacunas de polianhídrido, su afinidad con el agua, la liberación de las vacunas y sus efectos potenciadores son las principales complicaciones para la aplicación y actividad. Para mejorar la afinidad con el agua y la liberación del antígeno, a la nanopartícula se le añade de manera superficial polietilenglicol (PEG), un polímero de un óxido de etileno (carbono + oxígeno) (Gómez *et al.*, 2007). Además, las nanopartículas de polianhídrido recubiertas con manosa (azúcar), flagelina (proteína) de *Salmonella enteritidis* y lipopolisacáridos (azúcares + grasas) promueven el potenciamiento (adyuvancia) al mejorar la respuesta en la inmunización oral (Salman *et al.*, 2007; Gómez *et al.*, 2007).

Conclusiones

Las enfermedades zoonóticas causan pérdidas en la producción de la industria avícola y problemas de salud en los seres humanos. Por consiguiente, alternativas como la generación de nanovacunas han mostrado resultados prometedores en la lucha contra los patógenos que afectan a las aves de corral. Los nanomateriales más utilizados son quitosano, PLGA, VLP y polianhídridos y se espera que en el futuro cercano que las nanovacunas comerciales se desarrollarán utilizando los mismos nanomateriales. Desde esta perspectiva, el enfoque de Vacunología para Una Salud facilitará dirigir las investigaciones hacia soluciones para las enfermedades zoonóticas en aves de corral que afectan tanto a los seres humanos como a los ecosistemas.

Agradecimientos

Al CONAHCYT por el financiamiento de proyecto FC2016/2820.

Referencias

- Angulo, C. y H. León-Montoya. 2024. Vacunas diminutas. *Recursos Naturales y Sociedad* 10(1): 143-155.
- Angulo, C., V. Sanchez, K. Delgado, E. Monreal-Escalante, L. Hernández-Adame, M. Angulo, M. Tello-Olea y M. Reyes-Becerril. 2022. Oral organic nanovaccines against bacterial and viral diseases. *Microbial Pathogenesis* 169: 105648.
- Bose, R., S. Lee, y H. Park. 2016. Lipid-based surface engineering of PLGA nanoparticles for drug and gene delivery applications. *Biomaterial Research* 20: 34.
- Chandrasekar, S., B. Kingstand-Bakked, C. Wu, Y. Phanse, J. Osorio y A. Talaat. 2023. A DNA Prime and MVA Boost Strategy Provides a Robust Immunity against Infectious Bronchitis Virus in Chickens. *Vaccines* 11(2): 302.
- Clawson, C., L. Ton, S. Aryal, V. Fu. S. Esener y L. Zhang. 2011. Synthesis and characterization of lipid-polymer hybrid nanoparticles with pH-triggered poly(ethylene glycol) shedding. *Langmuir* 11(17): 10556-61.
- Dai, S., H. Wang y F. Deng. 2018. Advances and challenges in enveloped virus-like particle (VLP)-based vaccines. *Journal of Immunological Science* 2(2): 36-41.
- Desai, N. 2012. Challenges in Development of Nanoparticle-Based Therapeutics. *Nanotechnology in Drugs Development* 14(2).
- EL FINANCIERO. 2024. Paquete Económico 2025: *¿A qué rubros se destinará más dinero en el gobierno de Sheinbaum?*. EL FINANCIERO: Economía, Mercados y Negocios. En: <https://www.elfinanciero.com.mx/nacional/2024/07/07/paquete-economico-2025-a-que-rubros-se-destinara-mas-dinero-en-el-gobierno-de-sheinbaum/>, (Consultado el 01/08/2024).
- El-Ghany, A. 2019. Nanotechnology and its considerations in Polutry Field: An Overview. *Journal Of the Hellenic Veterinary Medical Society* 70(3): 1611.
- El-Ghany, W., M. Shaalan y H. Salem. 2021. Nanoparticles applications in poultry production: an updated. *World's Poultry Science Journal* 77(4): 1001-1025.
- El-Husseiny, M., N. Hagag, P. Pushko I. Treyakova, M. Naguib y A. Arafa. 2021. Evaluation of Evaluation of protective efficacy of influenza virus like particles prepared from H5N1 Virus of Clade 2.2.1.2 in chickens. *Vaccines* 9: 715.

- Eurogroup for Animals. 2024. The social costs of avian influenza and other animal diseases: Scientific. Eurogroup for Animals. En: https://www.eurogroupforanimals.org/files/eurogroupforanimals/2024-01/23012024_EfA_The%20social%20costs%20of%20avian%20influenza%20and%20other%20animal%20diseases_scientific%20statement_0.pdf, (Consultado el 01/08/2024).
- Food and Agriculture Organization. (2013) Poultry Development Review. FAO. En: <https://www.fao.org/4/i3531e/i3531e00.htm>, (Consultado el 01/08/2024).
- Food and Agriculture Organization. (2024) Gateway to poultry production and products: products and processing. En: <https://www.fao.org/poultry-production-products/products-processing/en/>, (Consultado el 01/08/2024).
- Gill, P. 2013. Nanocarriers, nanovaccines, and nanobacteria as nanobiotechnological concerns in modern vaccines. *Scientia IRANICA* 20(3): 1003-1013.
- Gómez, S., C. Gamazo, B. San Roman, M. Ferrer, S. Luisa y J. Irache. 2007. Gantrez® AN nanoparticles as an adjuvant for oral immunotherapy with allergens. *Vaccines* 25(29): 5263-5271.
- Haez, H. y Y. Attia. 2020. Challenges to the poultry industry: Current perspectives and strategies future after the COVID-19 outbreak. *Frontiers in Veterinary Science* 7(516).
- Haseeb, M., J. Huang, S. Ahmen, Z. Yang, M. Waqqas, M. Ehsan, M. Tahir, M. Ali, H. Ali, X. Song, R. Yan, L. Xu y X. Li. 2022. Em14-3-3 delivered by PLGA and chitosan nanoparticles conferred improved protection in chicken against *Eimeria máxima*. *Parasitology research* (121): 675-689.
- Karandikar, S., A. Mirani, V. Waybhase, V. Patravale y S. Patankar. 2017. Chapter 10- Nanovaccines for oral delivery-formulation strategies and challenges. *Nanostructures for Oral Medicine* 263-293.
- Kumar, A., S. Panickan, V. Bindu, A. Kumar, A. Ramakrishnan, S. Saxena, S. Shrivastava y S. Dandapt. 2023. Immunogenicity and protective efficacy of an inactivated Newcastle disease virus vaccine encapsulated in poly-(lactic-co-glycolic acid) nanoparticles. *Poultry Science* 102: 1-11.
- Li, B., L. Qiu, J. Zhang, S. Liu, M. Xu, J. Wang y H. Yang. 2024. Solubilization of chitosan in biologically relevant solvents by a low-temperature solvent-exchange method for developing biocompatible chitosan materials. *International Journal of Biological Macromolecules* (253)3: 127950.

- Marsian, J., H. Fox, M. Bahar, A. Kotecha, E. Fry, D. Stuart, A. Macadam, A. Rowlands y G. Lomonosoff. 2017. Plant-made polio type 3 stabilized VLPs—a candidate synthetic polio vaccine. *Nature communications* 8(245).
- Organización Mundial de La Salud. Influenza (Avian and other zoonotic). WHO 2024. En: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/influenza-\(avian-and-other-zoonotic\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/influenza-(avian-and-other-zoonotic)), (Consultado el 01/08/2024).
- Peixoto, C., M. Sousa, A. Silva, Carrondo y P. Alves. 2007. Downstream processing of triple layered rotavirus like particles. *Journal of Biotechnology* 10(127): 452-61.
- Poddar, K., y A. Kishore. 2022. Chapter Seven- Nanotechnology in animal production. *Emerging Issues in Climate Smart Livestock Production* 149-170.
- Pohjola, L., S. Nykasenoja, R. Kivisto, T. Soveri, A. Houvilainen, M. Hannien, M. Fredriksson. 2016. Zoonotic public health hazards in backyard chickens. *Zoonoses Public Health* 63(5): 420-430.
- Prakash, J., D. Prema, K.S. Venkataprasanna, K. Balagangadharan, N. Selvamurugan y G.D. Venkatasubbu. 2020. Nanocomposite chitosan film containing graphene oxide/hydroxyapatite/gold for bone tissue engineering. *International Journal of Biological Macromolecules* 154: 62–71.
- Salman, H., C. Gamazo, M. Agüeros y J. Irache. 2007. Bioadhesive capacity and immunoadjuvant properties of thiamine-coated nanoparticles. *Vaccine* 25(48): 8123-8132.
- Schat, K. 2014. Vaccines and Vaccination Practices: Key to Sustainable Animal Production. *Encyclopedia Of Agriculture and Food Systems* 5: 315-332.
- Shamekhi, M.A., H. Mirzadeh, A. Mahdavi, D. Rabiee, D. Mohebbi-Kalhari y M.E. Baghaban. 2019. Graphene oxide containing chitosan scaffolds for cartilage tissue engineering. *International Journal of Biological Macromolecules* 127: 396–405.
- Shrestha, A., J. Sadeyen y M. Iqbal. 2018. Enhancing protective efficacy of poultry vaccines through targeted delivery of antigens to antigen-presenting cells. *Vaccines* 6(4): 75.
- Smith, T., M. O'Kennedy, C. Ross, N. Lewis y C. Abolnik. 2023. The production of Newcastle disease virus-like particle in *Nicotiana benthamiana* as potential vaccines. *Frontiers in immunology* 14.

- Tamburaci, S., B. Cecen, O. Ustun, B.U. Ergur, H. Havitcioglu y Tihminlioglu, F. 2019. Production and characterization of a novel bilayer nanocomposite scaffold composed of chitosan/Si-nHap and Zein/POSS structures for osteochondral tissue regeneration. *ACS Applied Bio Materials* 2(4): 1440–1455.
- Tizard, I. 2009 *Introducción a la inmunología veterinaria*. ELSEVIER Veterinary Immunology. Ed. 8. España, Barcelona. 286-312 pp.
- Xu, X., Z. Ding, Q. Yuan, J. Ding, J. Li, W. Wang, Y. Cong, W. Ouyang, Y. Wang, J. Qian y R. Yin. 2018. A genotype VII Newcastle disease virus-like particles confer full protection with reduced load and decreased virus shedding. *Vaccine* 37(3): 444-451.
- Xu, H., S. Zhu, R. Govinden y H. Chenia. 2023. Multiple vaccines and strategies for pandemic preparedness of Avian Influenza Virus. *Viruses* 15(8): 1694.
- Yadav, M., B. Kaushik, G. Rao, C. Mohan y D. Vaya. 2023. Advances and challenges in the use of chitosan and its derivatives in biomedical fields: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* 5: 100323.
- Zhang, S., M. Liang, W. Gu, C. Li, F. Miao, X. Wang, C. Jin, L. Zhang, F. Zhang, Q. Zhang, L. Jiang, M. Li y D. Li. 2011. Vaccination with dengue virus-like particles induces humoral and cellular immune responses in mice. *Virology Journal* 30(8): 333.
- Zhang, Y., Y. Yuan, L. Zhang, L. Zhu, L. Wang, L. Wei, W. Sheng, C. Zhao, Y. Jing, J. Liao, L. Yong, T. Chao, P. Wei y M. Lan. 2021. Construction and immunogenicity comparison of three virus-like particles carrying different combinations of structural proteins of avian coronavirus infectious bronchitis virus. *Vaccines* (9)146.

Cita

León H., C. Angulo. Vacunas pequeñas, alas grandes. *Recursos Naturales y Sociedad*, 2025. Vol. 11 (1): 272-286. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0018>



Sometido: 01 de agosto de 2024

Aceptado: 10 de mayo de 2025

Editor ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz

Editor asociado: Dr. Arturo Sánchez Paz

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrazco

**Blue carbon ecosystems in Chiapas, Mexico:
the importance of their conservation**

Ecosistemas de carbono azul en Chiapas, México: la relevancia de su conservación

**Carolina Velázquez-Pérez^{1*}, José A. Arreola Lizarraga²,
Pablo Marroquín Morales³ y Emilio I. Romero-Berny⁴**

Resumen

Los manglares, marismas y pastos marinos son ecosistemas costeros que destacan por su capacidad de captar y almacenar dióxido de carbono en forma de carbono orgánico (carbono azul) y juegan un papel fundamental ante el cambio climático. En este artículo se expone una síntesis de la relevancia de los ecosistemas de carbono azul en la zona costera de Chiapas (México), indicando su composición, capacidad de captura de carbono y su importancia para la sociedad. Entre los ecosistemas de carbono azul de Chiapas, los manglares destacan por ser los de mayor desarrollo estructural en el Pacífico Mexicano. Estos ecosistemas representan un capital natural valioso cuya conservación es estratégica para afrontar efectos del cambio climático.

Palabras clave

Ecosistemas costeros, cambio climático, zona costera, Pacífico mexicano.

¹ Programa de Doctorado en Ciencias en Biodiversidad y Conservación de Ecosistemas Tropicales, Instituto de Ciencias Biológicas, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

² Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Guaymas, Sonora, México.

³ Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ciencias Agrícolas Campus IV, Huehuetán, Chiapas, México.

⁴ Laboratorio Interdisciplinario de Ecología Costera, Centro de Investigaciones Costeras, Instituto de Ciencias Biológicas, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tonalá, Chiapas, México

* Autor de correspondencia: E-mail: carolinavepe4@gmail.com



Abstract

Mangroves, tidal marshes, and seagrass beds are coastal ecosystems that stand out for their ability to capture and store carbon dioxide in the form of organic carbon (blue carbon) and play a fundamental role in climate change. This article provides an overview of the importance of blue carbon ecosystems in the coastal zone of Chiapas (Mexico), indicating their composition, carbon capture capacity, and importance to society. Among the blue carbon ecosystems of Chiapas, mangroves stand out as the most structurally developed in the Mexican Pacific. These ecosystems represent valuable natural capital whose conservation is strategic for addressing the effects of climate change.

Keywords

Coastal ecosystems, climate change, coastal zone, Mexican Pacific.

Antecedentes

El carbono azul se refiere al bióxido de carbono (CO_2) atmosférico que capturan y almacenan en forma de carbono orgánico los ecosistemas costeros, principalmente manglares (Figura 1a), marismas (Figura 1b) y pastos marinos (Figura 1c y 1d) (Alongi, 2012; Mitra y Zaman, 2015; Moritsch *et al.*, 2021), pero también se ha considerado el potencial de las macroalgas (Howard *et al.*, 2023). El término “carbono azul” se utilizó por primera vez en 2009, en un informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente como estrategia para mitigar los efectos del cambio climático (PNUMA, 2010).



Figura 1. Ecosistemas de carbono azul. a) Manglar de mangle rojo (*Rhizophora mangle*), Reserva de la Biosfera la Encrucijada, Chiapas, (Foto por Carolina Velázquez); b) Tular (*Typha domingensis*), Reserva de la Biosfera la Encrucijada, Chiapas, (Foto por Carolina Velázquez); c) y d) Pastos marinos (*Halodule wrightii*), laguna costera de Mar Muerto frontera entre Chiapas y Oaxaca, (Fotos por Emilio Romero).

Los ecosistemas costeros del carbono azul destacan por su alta capacidad para capturar y almacenar carbono que puede ser desde 2.5 hasta 5 veces mayor que los bosques y selvas terrestres (Donato *et al.*, 2011) y esto se explica por su alta productividad primaria neta; es decir, los ecosistemas de carbono azul a través de la fotosíntesis capturan el CO₂ y lo almacenan en sus tejidos (hojas, tallos, troncos, ramas y raíces), posteriormente mediante defoliación o cuando la planta muere se aporta materia orgánica que se deposita en los sedimentos y se acumula en las capas más profundas (Donato *et al.*, 2011; Taillardat *et al.*, 2018). La acumulación de carbono en el suelo de los ecosistemas de carbono azul es alta porque la descomposición de la materia orgánica generalmente es lenta, debido a que sus suelos carecen o tienen escaso oxígeno y entonces las tasas de acumulación se incrementan en los sedimentos (Giri *et al.*, 2011; Hernández, 2022; Johnson *et al.*, 2017). El mayor almacén de carbono en estos ecosistemas costeros se encuentra en el suelo, y puede permanecer desde cientos hasta miles de años (Moraes, 2019).

El carbono azul no incluye a todos los ecosistemas costeros y marinos porque para ello deben cumplir con algunos criterios, tales como: poseer reservas significativas de carbono almacenado en el suelo o sedimento, tener la capacidad de almacenar carbono a largo plazo, tener un alto potencial



de reducción de emisiones de dióxido de carbono, no generar efectos indeseables en los ecosistemas naturales aledaños, propiciar la posibilidad de implementar estrategias para conservar y aumentar los niveles de carbono azul almacenado y que sea factible implementar políticas de adaptación y mitigación del cambio climático (Lovelock y Duarte, 2019). Con base en lo anterior, en la estrategia de carbono azul se consideran a tres ecosistemas costeros que cumplen con todos los criterios: manglares, marismas y pastos marinos (Convention on Wetlands, 2021).

Los ecosistemas de carbono azul juegan un papel importante para reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera, porque se ha aportado evidencia de que capturan y almacenan emisiones de carbono equivalente al 50% de las emisiones anuales totales de toda la industria del transporte mundial (Nellemann *et al.*, 2009; de Suarez *et al.*, 2014; Moraes, 2019). Los manglares, marismas y pastos marinos secuestran 136,000 toneladas de carbono por año, que permanece en reservas de carbono a lo largo del tiempo (Heckbert *et al.*, 2011). Por estas razones, la conservación y restauración de los ecosistemas de carbono azul resulta estratégica para mitigar los efectos del cambio climático (Howard *et al.*, 2023).

El objetivo de este artículo es exponer una síntesis de la relevancia de los ecosistemas de carbono azul en la zona costera de Chiapas, indicando su composición, capacidad de captura de carbono y su importancia para la sociedad.

El Carbono azul en la costa de Chiapas

El nombre del estado de Chiapas proviene de la palabra “Chiapan” o “Tepechiapan, cuyo significado es “Cerro de la Chia” o “Agua debajo del Cerro.” Este estado se localiza al sureste de México con una superficie de 74,415 km² (3.8 % de la superficie del país) y un litoral de 256 km, donde desembocan más de 60 ríos que se originan en las regiones Sierra Madre de Chiapas y Soconusco (Figura 2). A lo largo de este litoral hay alrededor de 200 playas asociadas a las barreras arenosas que separan a los esteros del mar, los cuales mantienen comunicación con el mar a través de sus bocas (La costa Chiapaneca, 2001; Velázquez-Salazar *et al.*, 2021). En esta región predominan los climas cálido subhúmedo con lluvias en verano y cálido húmedo con lluvias abundantes en verano. En el periodo mayo - octubre la temperatura ambiental mínima promedio oscila entre 21 °C y 22.5 °C, mientras que la máxima promedio varía de 33 °C a 34.5 °C. La precipitación pluvial oscila entre 1,200 mm y 3,000 mm. En el periodo noviembre - abril la temperatura mínima promedio fluctúa entre 18 °C y 19.5 °C y la máxima supera los 33 °C. La precipitación varía entre 75 mm y 800 mm. Por su ubicación geográfica la región se encuentra expuesta a huracanes, ciclones, depresiones y tormentas

tropicales que se generan en el Océano Pacífico, desde mediados de mayo hasta finales de noviembre (CONAGUA, 2014).

La franja costera de Chiapas forma parte de la provincia fisiográfica de la planicie costera del Pacífico, la cual está constituida por una llanura de más de 280 km de longitud adyacente al litoral Pacífico, comienza desde la laguna costera Mar Muerto en el estado de Oaxaca y continúa hasta Guatemala. Esta franja de terreno casi plana, tiene en su extremo noroeste una anchura de 15 km, en tanto que su extremo sureste es de 35 km, teniendo una inclinación promedio de 1 m por km. Esta pendiente se mantiene hacia la plataforma continental, donde el relieve submarino alcanza profundidades promedio de 50 m a 35 km de la costa y de 100 m a 80 km de la costa (Sánchez Barreda, 1981; CONAGUA, 2014).

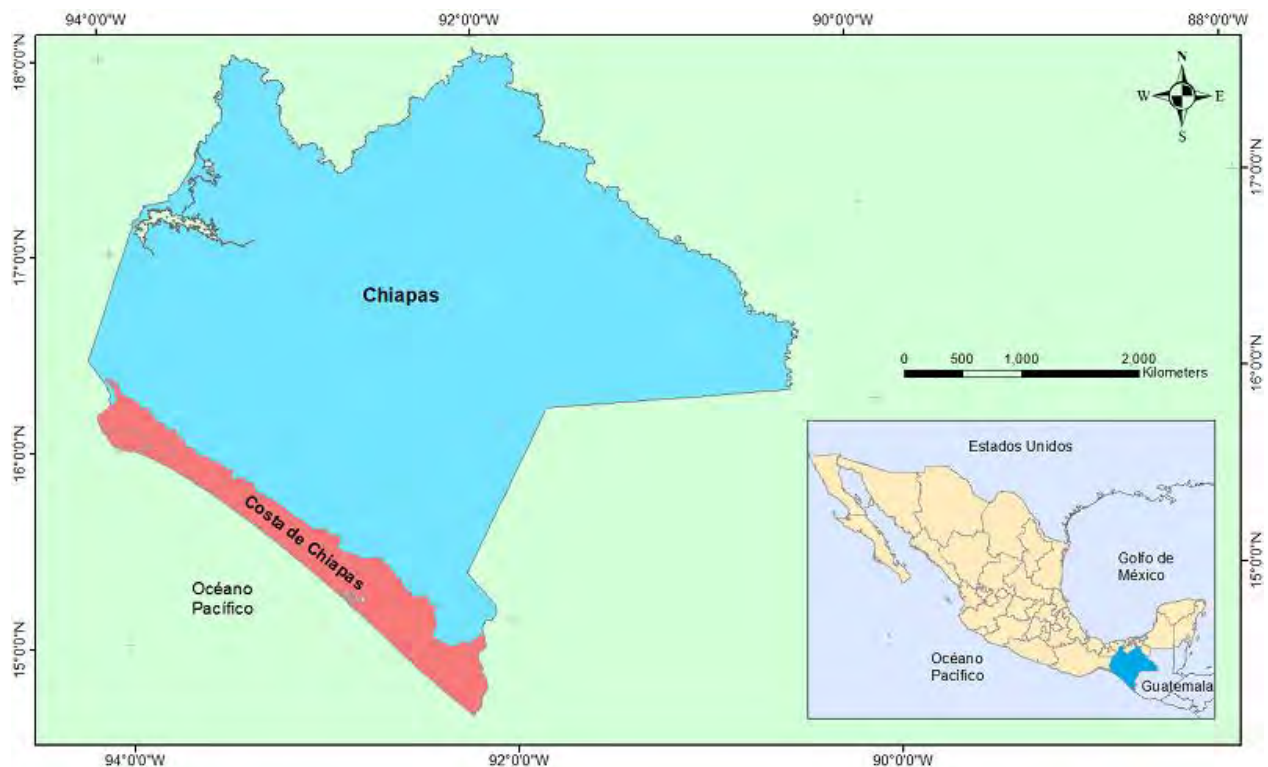


Figura 2. Localización de la costa de Chiapas, presenta un litoral de 256 km.

En la costa de Chiapas se encuentran asentamientos humanos con una población de 764,437 habitantes (INEGI, 2020), donde se desarrollan actividades de turismo, pesca ribereña y de mediana altura, agricultura, ganadería, cacería y silvicultura (INE, 1999; UNESCO, 2024).

En relación con los ecosistemas de carbono azul, los manglares de Chiapas cubren 49,618 hectáreas y ocupa el sexto sitio de los 17 estados con manglares en México (CONABIO, 2020). Los



manglares de Chiapas están representados por seis especies: *Rhizophora mangle*, *Rhizophora harrisonii*, *Laguncularia racemosa*, *Avicennia germinans*, *Avicennia bicolor*, *Conocarpus erectus* (Velázquez-Salazar et al., 2021). En la Reserva de la Biosfera la Encrucijada, se encuentran los manglares más altos del Pacífico mexicano con árboles de hasta 38 m de altura y 50 cm de diámetro (Adame et al., 2015; Tovilla-Hernández et al., 2020; Velázquez-Salazar et al., 2021).

En México la cobertura de marismas salobres es de 69,900 hectáreas, pero no se distribuyen en la costa de Chiapas (CCA, 2016). Sin embargo, en zonas adyacentes al manglar, existe vegetación herbácea inundable dominada por tular, una comunidad de plantas monocotiledóneas que alcanzan 3 m de altura, con densidad muy alta y que se desarrollan en zonas con cuerpos de agua dulce o salobre de hasta 2 m de profundidad, ya sea de corriente lenta o estacionaria (remansos). Cubre superficies importantes de áreas lacustres, así como orillas de zanjas, canales y remansos de río y son inundadas por la marea esporádicamente (Rojas y Vidal 2008; Howard et al., 2014; Moristch et al., 2021). En particular, la vegetación de tular en Chiapas es dominada por la especie *Typha domingensis*. Sjögersten et al. (2021) estimaron que la cobertura de vegetación herbácea inundable (incluyendo el tular) en Chiapas es de 24,160 ha.

En México, los pastos marinos cubren 919,300 hectáreas y se distribuyen en cuerpos de agua costeros templados y tropicales tales como lagunas costeras, estuarios y esteros, así como en la zona costera desde el intermareal hasta los 90 m de profundidad (CCA, 2016). En México se han registrado 11 especies de pastos marinos, distribuidas en zonas costeras de clima tropical, templado y de transición entre éstos (Herrera-Silveira et al., 2019). En Chiapas, recientemente se han reportado praderas de *Halodule wrightii* en la laguna Mar Muerto, aunque se desconoce su cobertura (Romero-Berny et al., 2024).

En Chiapas, el ecosistema de carbono azul más estudiado es el manglar, además se tienen dos registros de tular y un registro de pastos marinos. El almacén total de carbono de los ecosistemas costeros de Chiapas es de $938 \pm 836 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para manglares, y $643 \pm 618 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para tular. La mayor parte de este carbono está en el suelo, en manglares $854 \pm 820 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y en tular $616 \pm 637 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Tabla 1; Figura 3).

Tabla 1. Estimaciones de carbono azul en ecosistemas costeros de Chiapas. Abreviatura de especies: Rm, *Rhizophora mangle* (mangle rojo), Ag, *Avicennia germinans* (mangle negro), Lr, *Laguncularia racemosa* (mangle blanco), Rh, *Rhizophora harrisonii* (mangle amarillo), Ce, *Conocarpus erectus* (mangle botoncillo), Td, *Typha domingensis* (tule), Hw, *Halodule wrightii*. La especie dominante se indica en negrita. RB: Reserva de la Biosfera, Mg: Megagramo igual a una tonelada.

Sitio	Ecosistema	Especies	Almacén de carbono azul Mg C ha ⁻¹			Referencia
			Aéreo	Subterráneo		
				Suelo	Raíz	
RB La Encrucijada	Manglar	Rm , Ag, Lr, Rh	215	575.3	-	Adame <i>et al.</i> , 2015
Norte de la costa Chiapas	Manglar	Ag , Lr, Rm	47.2	118.1	-	Gamboa, 2017
Chiapas	Manglar	Rm, Ag, Lr	-	2000	-	INECC-PNUD, 2017
RB La Encrucijada	Manglar	Rm , Ag, Lr	87	-	-	Velázquez-Pérez <i>et al.</i> , 2019
RB La Encrucijada	Manglar	Rm , Ag, Lr	-	-	11.4	Gutiérrez, 2019
RB La Encrucijada	Manglar	Rm , Ag, Lr	-	-	10.5	Arreola, 2019
RB La Encrucijada	Manglar	Rm , Rh, Ag, Lr, Ce	70	1400	-	Sjögersten <i>et al.</i> , 2021
RB La Encrucijada	Manglar	Rm , Ag, Lr	-	178.6	-	Barreras-Apodaca <i>et al.</i> , 2017
RB La Encrucijada	Tular	Td	38.2	298.3	-	Adame <i>et al.</i> , 2015
RB La Encrucijada	Tular	Td	8.5	1350	-	Sjögersten <i>et al.</i> , 2021
Laguna Mar Muerto	Pasto marino	Hw	0.35	-	-	Romero-Berny <i>et al.</i> , 2024

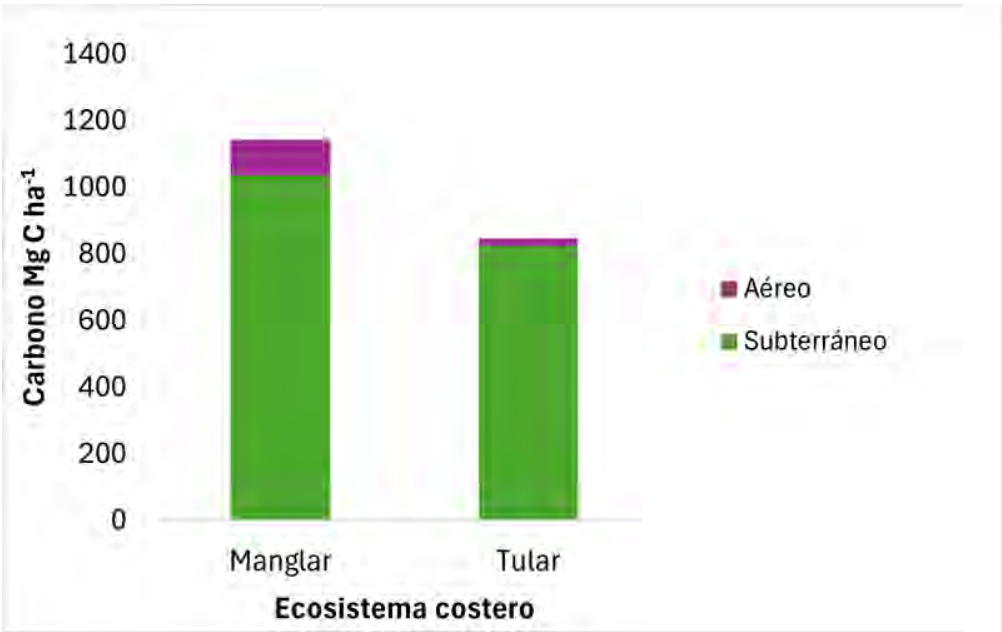


Figura 3. Distribución del carbono azul en ecosistemas costeros de Chiapas, el mayor almacén de carbono se encuentra en la parte subterránea.



La importancia de medir la cantidad total de carbono almacenado dentro de un área en particular consiste en conocer la cantidad de carbono capturado y con ello estimar el potencial de mitigación del efecto de emisiones de gases de efecto invernadero. Conocer las existencias de carbono otorga la posibilidad para acceder a los financiamientos de la estrategia del carbono azul que ofrecen los gobiernos o empresas de países desarrollados. Esto implica monitorear los cambios en las existencias de carbono y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a través del tiempo (Howard *et al.*, 2014). En Chiapas aún se carece de información sobre las existencias de carbono azul en la región sur de la zona costera, de tal forma que es necesario incrementar los esfuerzos para generar la información completa de carbono azul, evaluar los cambios en las existencias a lo largo del tiempo, estimar los flujos de carbono, así como monitorear las emisiones de CO₂ y con ello tener la posibilidad de acceder a los financiamientos de carbono azul.

Amenazas de los ecosistemas de carbono azul en Chiapas

Los ecosistemas de carbono azul de Chiapas sufren un continuo deterioro, como resultado de la explotación de los recursos naturales o por prácticas relacionadas con actividades económicas (Toledo, 2018). El uso de fuego para la caza o saqueo de fauna, principalmente de las tortugas de agua dulce como crucilla o cruzalluchi (*Staurotypus salvinii*), sabanera (*Rhinochlemmys pulcherrima*), negra (*Pseudodermys grayi*) y casquito amarillo (*Kinosternon scorpioides*), representa una causa de generación de incendios que afectan manglares y humedales (CONANP, 2007). Los ecosistemas costeros de Chiapas también son afectados por la ampliación de las áreas para la agricultura y la ganadería; que destruyen los bosques de manglares para establecer cultivos principalmente de palma africana (*Elaeis guineensis*) y usan la madera para cercar los potreros de la ganadería, así como para la construcción de viviendas y palapas (Toledo, 2018). Otro aspecto que se suma a la degradación de los ecosistemas costeros, es la continua sedimentación de lagunas y manglares, que se produce por el arrastre de sedimentos de los ríos y arroyos hasta el litoral como efecto de la deforestación en la cuenca alta, afectando la ecología de lagunas costeras y manglares (Tovilla-Hernández *et al.*, 2009; Toledo, 2018). La canalización y rectificación de ríos realizado por CONAGUA ha contribuido a acelerar este proceso (INE, 1999). Existen otras actividades económicas que operan sin control y también provocan contaminación, como el Ingenio azucarero de Huixtla que opera sin una planta de tratamiento de aguas residuales y contamina los ríos, esteros y lagunas; la actividad minera a cielo abierto en la zona de la Sierra Madre de Chiapas, en la que también se utilizan químicos que son arrastrados por los ríos, hasta la zona costera y que impactan de manera extraordinaria a los ecosistemas generando ecocidio (Bellinghausen, 2014; Toledo, 2018). Lo

anteriormente expuesto es consistente con lo observado en otras regiones costeras donde el uso de la tierra y los cambios en el uso de la tierra son los factores principales de la pérdida y degradación de los ecosistemas de carbono azul, lo que con frecuencia se justifica con el pretexto de promover el desarrollo económico y social (Jamilah *et al.*, 2025).

En Chiapas, como consecuencia de los factores de degradación se han perdido 4283 ha de manglar entre 1972 y 2020 (CONABIO, 2020) y se tiene un registro de 923 ha de manglar degradado en Chiapas (Velázquez-Salazar *et al.*, 2021). No se ha cuantificado la pérdida de tular en la costa; sin embargo, el desarrollo costero de las últimas décadas ha incidido en la disminución de su cobertura.

La importancia del carbono azul en la gestión costera

La conservación de los manglares, marismas y pastos marinos es sumamente importante porque permite mantener los almacenes de carbono en el suelo y evitar su liberación a la atmósfera como emisiones de carbono azul. Además, la conservación de los ecosistemas de carbono azul permite garantizar la protección de los ecosistemas de mayor productividad, así como maximizar la captura efectiva de carbono (Lovelock *et al.*, 2017). El financiamiento del carbono azul representa una estrategia viable para la gestión de la zona costera, debido a que podría proporcionar las herramientas y recursos para implementar acciones de conservación y restauración de los ecosistemas. El acceso al mercado de carbono implica cuantificar el carbono total en la zona costera y venderse como créditos que el comprador utiliza para compensar las emisiones. Posteriormente los créditos de carbono se verifican y luego se venden en el mercado (Araujo, 2019).

Conservar los ecosistemas costeros implica mantener servicios ecosistémicos como la reducción de las emisiones de CO₂ y la mitigación de efectos adversos por el cambio climático. Así mismo, implica preservar otros servicios relativos a la protección de las poblaciones costeras de tormentas y huracanes, porque la vegetación costera disipa la energía de las olas y las raíces reducen el arrastre de sedimentos, protegiendo a las personas y la infraestructura del oleaje de tormenta (Arkema *et al.*, 2013; Hochard *et al.*, 2019; Narayan *et al.*, 2017; Moritsch *et al.*, 2021). La conservación de los ecosistemas costeros también ayuda a reducir la sedimentación, además se podrían implementar técnicas de ingeniería basadas en la naturaleza para limitar el movimiento del agua y promover la deposición de sedimentos. Por ejemplo, el establecimiento de arrecifes de ostras ha demostrado la capacidad de mejorar la captura de sedimentos en América del Norte, lo que ayudaría a reducir el arrastre de sedimentos y por lo tanto la sedimentación en línea de costa (Rodríguez *et al.*, 2014; Morris *et al.*, 2018; Moritsch *et al.*, 2021).



Consideraciones finales y perspectivas

Es importante considerar lo expuesto por Dahl *et al.* (2025) acerca de los procedimientos de investigación comunes que pueden mejorarse para reforzar las evaluaciones biofísicas de los ecosistemas de carbono azul y apoyar la ejecución de los proyectos, así como buenas prácticas para alinear la investigación con la política, la gestión y los valores éticos.

La conservación de los ecosistemas de carbono azul requiere una gestión efectiva y es posible implementar programas para su conservación y restauración (CCA, 2017; Herrera-Silveira *et al.*, 2020). Por ejemplo, las contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC) de México incluidas en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), incluyen conservación, gestión, protección y restauración de ecosistemas costeros y marinos. Estas actividades permiten la permanencia de los ecosistemas de carbono azul donde se llevan a cabo las actividades productivas como el turismo y pesca ribereña en la zona costera de Chiapas, además aseguran la protección de la infraestructura y de la población humana ante fenómenos meteorológicos.

Chiapas posee un capital natural valioso en sus ecosistemas de carbono azul, por lo que su conservación resulta crucial para afrontar los efectos del cambio climático y es trascendente para el desarrollo sostenible.

Agradecimientos

C.V-P. Agradece a CIBNOR Unidad Guaymas por cederle la oportunidad de realizar una estancia de Investigación donde surgió la idea de realizar este estudio. También agradece por la beca No. 769229, otorgada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) para realizar estudios de Doctorado en Biodiversidad y Conservación de Ecosistemas Tropicales en la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), Instituto de Ciencias Biológicas.

Los autores agradecen a dos revisores anónimos, a la Dra. Alejandra Mazariegos Villareal por la revisión y edición del escrito y a la Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrasco por el diseño gráfico editorial.

Referencias

- Adame, M., N. Santini, C. Tovilla, A. Vázquez-Lule, L. Castro y M. Guevara. 2015. Carbon stocks and soil sequestration rates of tropical riverine wetlands. *Biogeosciences* 12: 3805–3818.
- Alongi, D.M. 2012. Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management* 3 (3): 313–322.
- Arkema, K.K., G. Guannel, G. Verutes, S. A. Wood, A. Guerry, M. Ruckelshaus, P. Kareiva, M. Lacayo y J. M. Silver. 2013. Coastal habitats shield people and property from sea level rise and storms. *Nature Climate Change* 3 (10): 913–918.
- Araujo G. Z. 2019. Financiamiento de proyectos de carbono azul: opciones de financiamiento, el sector privado [ppt]. Disponible en: <https://www2.cifor.org/wp-content/uploads/blue-carbon-event/Day3/7.%20IDOM-%20Financiamiento%20carbono%20azul.pdf>
- Arreola, E. 2019. Evaluación de la biomasa y carbono de raíces de manglar en la Reserva de la Biosfera La Encrucijada, Chiapas, México. Tesis Licenciatura. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Chiapas, México. 75 pp.
- Barreras-Apodaca, A., Z. Sánchez-Mejía, M. Bejarano, L. Méndez-Barroso y R. Borquez-Olguín. 2017. Carbono almacenado en la capa superficial de suelo de dos manglares geográficamente contrastantes. 258-264 pp. En: Paz, F., Velázquez, A., Rojo, M. (Eds.) Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2017; Programa Mexicano del Carbono; Instituto Tecnológico de Sonora: Álamos, México. 648 pp.
- Bellinghausen, H. 2014. "La minería en Chiapas", La Jornada. <https://web.jornada.com.mx/2014/04/03/> (Consultado el 3/04/2014).
- CCA. 2016. Carbono azul en América del Norte: evaluación de la distribución de los lechos de pasto marino, marismas y manglares, y su papel como sumideros de carbono, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá, 58 pp.
- CCA. 2017. Análisis de las oportunidades para la integración del concepto de carbono azul en la política pública mexicana, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá, 102 pp.



- CONABIO. 2020. Extensión de distribución de manglares. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad México. <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/smmm/extensionDist> (Consultado el 15/04/2025).
- CONAGUA. 2014. “Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en la cuenca de la costa de Chiapas”. Comisión Nacional del Agua, México. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programas-de-medidas-preventivas-y-de-mitigacion-a-la-sequia-pmpms-por-consejo-de-cuenca>. (Consultado el 12/08/2024).
- CONANP. 2007. PROYECTO FR001 “Programa de atención a incendios forestales en las Reservas de La Biosfera El Ocote, La Encrucijada y La Sepultura en Chiapas”. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México. http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/infFR001_1ra_parte.pdf. (Consultado el 12/08/2024).
- Convention on Wetlands. 2021. The contributions of blue carbon ecosystems to climate change mitigation. Briefing Note No. 12. Gland, Switzerland: Secretariat of the Convention on Wetlands.
- de Suarez, J.M., B. Cicin-Sain, K. Wowk, R. Payet y O. Hoegh-Guldberg. 2014. Ensuring survival: Oceans, climate and security. *Ocean & Coastal Management* 90: 27–37.
- Dahl, M., P.S. Lavery, I. Mazarrasa., J. Samper-Villarreal., M.F. Adame, S. Crooks, C.M. Duarte, D.A. Friess, D. Krause-Jensen, C. Leiva-Dueñas, C.E. Lovelock, P.I. Macreadie, P. Masque., M.A. Mateo y O. Serrano. 2025. Recommendations for strengthening blue carbon science. *One Earth* 8.
- Donato, D. C., J.B. Kauffman, D. Murdiyarso, S. Kurnianto, M. Stidham y M. Kanninen. 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience* 4 (5): 293–297.
- Gamboa, J. 2017. “Almacenes y captura de carbono orgánico en manglares del sistema lagunar hiperhalino “Mar Muerto” en la costa de Chiapas-Oaxaca”. Tesis Maestría. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Yucatán, México. 112 pp.
- Giri, C., E. Ochieng, L.L. Tieszen, Z. Zhu, A. Singh, T. Loveland, J. Masek y N. Duke. 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography* 20 (1): 154–159.

- Gutiérrez, M. 2019. Determinación de la biomasa y contenido de carbono en raíces de un bosque de mangle en la Reserva de la Biosfera La Encrucijada, Chiapas. Tesis Maestría. El Colegio de la Frontera Sur. Chiapas, México. 106 pp.
- Heckbert, S., R. Costanza, E.S. Poloczanska y A.J. Richardson. 2011. Climate regulation as a service from estuarine and coastal ecosystems. Portland, OR, USA: Portland State University.
- Hernández, E. 2022. El carbono azul y su contribución a la conservación de los manglares en México. *Diversidad* (23) 65-79.
- Herrera-Silveira, J.A., S.M. Morales-Ojeda, J.E. Mendoza-Martínez, I. Medina-Gómez, J. Ramirez-Ramirez, J.M. Sandoval-Gil y V.F. Camacho-Ibar. 2019. Pastos marinos. 150-177. En: Paz-Pellat, F., Hernández-Ayón J. M., Sosa-Ávalos R., Velázquez-Rodríguez A. S. (Eds.). Estado del Ciclo del carbono en México, Programa Mexicano del Carbono: Agenda Azul y Verde, Texcoco, Estado de México, México. 716 p.
- Herrera-Silveira, J. A., M.A. Pech-Cardenas, S.M. Morales-Ojeda, S. Cinco-Castro, A. Camacho-Rico, J.P. Caamal Sosa, J.E. Mendoza-Martinez, E.Y. Pech-Poot, J. Montero, y C. Teutli-Hernandez. 2020. Blue carbon of Mexico, carbon stocks and fluxes: a systematic review. *PeerJ* 8:e8790
- Hochard, J.P., S. Hamilton, y E.B. Barbier. 2019. Mangroves shelter coastal economic activity from cyclones. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116 (25), 12232–12237.
- Howard, J., S. Hoyt, K. Isensee, M. Telszewski y E. Pidgeon (Eds.) 2014. Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. Arlington, Virginia, USA. 180 pp.
- Howard, J., A.E. Sutton-Grier, L.S. Smart, Ch.C. Lopes, J. Hamilton, J. Kleypas, S. Simpson, J. McGowan, A. Pessarrodona, H.K. Alleway y E. Landis. 2023. Blue carbon pathways for climate mitigation: Known, emerging and unlikely. *Marine Policy* (156), 105788.
- INECC-PNUD México. 2017. Estudio para la identificación, caracterización y evaluación del balance entre las emisiones de GEIs y las zonas de captura y almacenamiento de carbono en zonas de ecosistemas costero/marinos del Pacífico, Golfo de México y la Península de Yucatán (Carbono azul). Proyecto 85488 “Sexta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, 430 pp. Programa Mexicano del Carbono, A.C. México.
- INEGI. 2020. Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#microdatos>. (Consultado el



10/09/2024)

- INE. 1999. Programa de Manejo Reserva de la Biosfera La Encrucijada. Instituto Nacional de Ecología. México. <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/programas-de-manejo>. (Consultado el 05/08/2025)
- Jamilah, M., A. Becker, S. Loong-Lee, T.E.A. Quiros, S. Yin-Chee, C. Evans, Y. Yang-Tan, L. Lin-Ti, I. Pishaly A.Y. Hui Then. 2025. Socioeconomic impacts linked to land use and land use changes affecting blue carbon ecosystems in Southeast Asia: A systematic map. *Ocean & Coastal Management*, (267): 107643.
- Johnson, R.A., A.G. Gulick, A.B. Bolten y K.A. Bjorndal. 2017. Blue carbon stores in tropical seagrass meadows maintained under green turtle grazing. *Scientific Reports (Nature Publisher Group)* (7): 1–11.
- La costa Chiapaneca. 2001. La costa Chiapaneca. *Literatura*, 115-116. <http://historico.juridicas.unam.mx/publica/librev/rev/derhum/cont/52/pr/pr43.pdf>
- Lovelock, C. E., T. Atwood, J. Baldock, C.M. Duarte, S. Hickey, P.S. Lavery, P. Masque, P. Macreadie, A.M. Ricart, O. Serrano y A. Steven. 2017. Assessing the risk of carbon dioxide emissions from blue carbon ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15: 257–265.
- Lovelock, C.E., y C.M. Duarte. 2019. Dimensions of Blue Carbon and emerging perspectives. *Biology Letters*, 15(3), 20180781.
- Mitra, A. y S. Zamán. 2015. *Blue Carbon Reservoir of the Blue Planet*. Springer, London. 306 pp.
- Moraes, O. 2019. Blue carbon in area-based coastal and marine management schemes – a review. *Journal of the Indian Ocean Region* 1-20.
- Morris, R., T. Konlechner, M. Ghisalberti y S. Swearer. 2018. From grey to green efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence. *Global Change Biology* 24, 1827–1842.
- Moritsch, M.M., M. Young, P. Carnell, P.I. Macreadie, C. Lovelock, E. Nicholson, P.T. Raimondi, L.M. Wedding, y D. Ierodiaconou. 2021. Estimating blue carbon sequestration under coastal management scenarios. *Science of the Total Environment* 777: 145962.

- Narayan, S., M.W. Beck, P. Wilson, C.J. Thomas, A. Guerrero, C.C. Shepard, B.G. Reguero, G. Franco, J.C. Ingram y D. Trespalacios. 2017. The value of coastal wetlands for flood damage reduction in the northeastern USA. *Scientific Reports* 7: 9463.
- Nellemann, C., E. Corcoran, C.M. Duarte, L. Valdés, C. de Young, L. Fonseca y G. Grimsditch. (Eds). 2009. *Blue carbon: A rapid response assessment*. United Nations Environment Programme, Grid-Arendal.
- PNUMA. 2010. *Informe Anual aprovechando la oportunidad verde*. Programa de las Naciones Unidad para el Medio Ambiente. 96 pp.
- Rodríguez, A.B., F.J. Fodrie, J.T. Ridge, N.L. Lindquist, E.J. Theuerkauf, S.E. Coleman, J.H. Grabowski, M.C. Brodeur, R.K. Gittman, D.A. Keller y M.D. Kenworthy. 2014. Oyster reefs can outpace sea-level rise. *Nature Climate Change* 4 (6): 493–497.
- Rojas, G.J. y R.R.M. Vidal. 2008. *Catálogo tipológico de humedales lacustres y costeros del estado de Chiapas*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales: México. 45 pp.
- Romero-Berny, E.I., M.E. Hernández-Cueva, J.J. Jiménez-González, E. Arreola-Sánchez, E. Grajales-Rabasa y J. A. Toledo-González. 2024. Primer registro y estructura de praderas de *Halodule wrightii* en una laguna costera del Pacífico Sur Mexicano. En: *Investigaciones sobre ecosistemas costeros de México*. Memorias del 8vo Simposio de la Red para el conocimiento de los recursos costeros. Boca del Río, Veracruz, México. Universidad Veracruzana. 6-9 de mayo 2024. 448 pp.
- Sanchez-Barreda, L.A. 1981. *Evolución geológica del margen continental del Golfo de Tehuantepec en el suroeste de México*. Tesis doctoral. Universidad de Texas en Austin (inérita). Austin, Estados Unidos. 191 pp.
- Sjögersten S., B. de la Barreda-Bautista, C. Brown, D. Boyd, H. Lopez-Rosas, E. Hernandez, R. Monroy, M. Rincón, C. Vane, V. Moss-Hayes, J.A. Gallardo-Cruz, D. Infante-Mata, J. Hoyos-Santillan, J. Vidal-Solórzano, C. Peralta-Carreta y P. Moreno-Casasola. 2021. Coastal wetland ecosystems deliver large carbon stocks in tropical Mexico. *Geoderma* 403.
- Taillardat, P., D.A. Friess y M. Lupascu. 2018. Mangrove blue carbon strategies for climate change mitigation are most effective at the national scale. *Biology letters* 14 (10): 20180251.
- Toledo, M.J. 2018. Reflexiones y propuestas de solución sobre la crisis ambiental: el caso de La Encrucijada, Chiapas. *Denarius*, (34), 195-224.



- Tovilla-Hernández, C., E. Aguilar-López, O.G. Gordillo-Solís, C.J. Rojas-García y A.D. Vázquez-Lule. 2009. Caracterización del sitio de manglar La Encrucijada. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. pp 20.
- Tovilla-Hernandez, C., J.C. De La Presa Pérez, F. Ovalle Estrada, R.L. Salas Roblero, G. De La Cruz Montes y A.L. Ramírez. 2020. Inventario y monitoreo del estado actual de los bosques de manglar Chiapas y Oaxaca. El Colegio de la Frontera Sur. Unidad Tapachula. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. FN005. Ciudad de México.
- UNESCO. 2024. La Encrucijada-Programa el hombre y la biosfera. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. <https://www.unesco.org/mab/50anniversary/es/la-encrucijada>. (07/08/2024).
- Velázquez-Pérez, C., C. Tovilla-Hernández, E.I. Romero-Berny y A. De Jesús-Navarrete. 2019. Estructura del manglar y su influencia en el almacén de carbono en la Reserva La Encrucijada, Chiapas, México. *Madera y Bosques*, 25(3): e2531885.
- Velázquez-Salazar S., M.T. Rodríguez-Zúñiga, J.A. Alcántara-Maya, E. Villeda-Chávez, L. Valderrama-Landeros, C. Troche-Souza, B. Vázquez-Balderas, I. Pérez-Espinosa, M.I. Cruz-López, R. Ressler, D.V.G. De la Borbolla, O. Paz, V. Aguilar-Sierra, F. Hruby y J.H. Muñoa-Coutiño. 2021. Manglares de México. Actualización y análisis de los datos 2020. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México CDMX. 168 pp.

Cita

Velázquez-Pérez C., J.A. Arreola Lizárraga, P. Marroquín Morales, E.I. Romero-Berny. Ecosistemas de carbono azul en Chiapas, México: la relevancia de su conservación. *Recursos Naturales y Sociedad*, 2025. Vol. 11 (1): 288-303. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2025.11.11.01.0019>

Sometido: 15 de enero de 2025

Aceptado: 09 de mayo de 2025

Editora ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editora asociada: Dra. Alejandra Mazariegos Villarreal

Diseño gráfico editorial: Ing. Fca. Elizabeth Villegas Carrasco

En memoria de: Dr. Humberto Villarreal Colmenares (1960 – 2025)

Edilmar Cortés-Jacinto¹, Alejandra Villarreal García y José Naranjo Páramo¹

A los 64 años cumplidos se ha cerrado el ciclo de la vida del doctor Humberto Villarreal Colmenares, quien ha dejado un legado perdurable en los campos del conocimiento del área de la acuicultura, en sus diversas líneas de investigación científica, pionero en el desarrollo de la acuicultura sostenible, de liderazgo nacional e internacional. Desde su ingreso al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) en 1989 hasta el presente año, fue un distinguido académico e investigador. Obtuvo el título profesional con honores de Ing. Bioquímico por el Tecnológico de Monterrey (ITESM) en 1982, sus estudios de posgrado los realizó becado por CONACYT en la Universidad de Queensland, St. Lucia, Queensland, Australia de 1983 en 1989.



¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo Santa Rita Sur, La Paz, Baja California Sur, 23096 – México.



A su regreso a México se incorporó al Departamento de Biología Marina del CIBNOR en donde fue responsable de los primeros proyectos de investigación con camarón, contribuyó en la implementación y desarrollo institucional con la Unidad Guaymas del CIBNOR (1993-1997), Coordinó el Programa de Acuicultura del CIBNOR durante 10 años en 2 periodos (1998 – 2004 y de 2007-2009). y BIOHELIS el Parque de Innovación Tecnológica de CIBNOR, el cual se gestó y construyó de 2009-2012, Coordinando dicho Parque hasta 2019, con el objetivo de transformar el conocimiento científico del CIBNOR en productos innovadores de base tecnológica que mejoren la competitividad de las empresas del sector acuícola, generando empleos y oportunidades para el personal técnico, contribuyendo a la seguridad alimentaria del país.



Sus contribuciones en sus líneas de investigación, innovación, y desarrollo tecnológico fueron publicadas en revistas internacionales del más alto nivel: *Reviews in Aquaculture*, *Aquaculture*, *A. Research*, *A Nutrition*, *Journal of The World Aquaculture Society*, *Comparative Biochemistry And Physiology Part A Physiology*, entre otras.

Fue distinguido con el Premio Tecnos 2008 por el gobierno de Nuevo León, el Premio ADIAT en 2010, y el Congreso del Estado de Baja California Sur aprobó por mayoría de votos el otorgamiento de la Medalla al Mérito Científico y Tecnológico en su edición 2014.



El Dr. Villarreal, de 2023 a 2024 fue presidente de la World Aquaculture Society (WAS), y miembro de la Academia Mexicana de Ciencias. Como académico fue un activo promotor de los Programa de Posgrado del CIBNOR, así como la enseñanza de pre y posgrado, tanto en el CIBNOR, como profesor invitado de la Universidad de Buenos Aires, entre otras instituciones extranjeras y nacionales, liderando proyectos nacionales e internacionales relacionados con la acuicultura, incluyendo proyectos del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), el Plan Maestro para el Desarrollo de la Acuicultura en México para el Gobierno Federal, colaboró con FAO, APEC, ONGs y Gobiernos de diferentes estados del país.

Un científico en el sentido más estricto, investigador incansable durante 40 años, profundamente nacionalista, una figura de respeto entre sus colegas, solidario siempre con las clases desprotegidas. Su vida fue ejemplo de una búsqueda constante por orientar los grandes beneficios de una acuicultura sustentable. Su aguda inteligencia siempre con preguntas incisivas, lo hizo una figura respetada, su tránsito vital transcurrió con la fundación de la Sociedad Mexicana de Acuicultura (SOMEXACUA).



Ciertamente ocupará un lugar distinguido, un sitio de honor ante la infraestructura del CIBNOR. Para sus amigos, colaboradores, exalumnos y alumnos, en sus diferentes generaciones, su recuerdo será siempre de admiración total, de gran respeto y una enorme gratitud por todo lo que nos deja su partida.

