BiotecnoLógica® Magazine

Revista en línea de divulgación biotecnológica



Biotecnología Azul: El poder oculto de la mucosidad de los pulpos

MACARIO SAVIN AMADOR, LILIANA HERNÁNDEZ OLALDE, OSCAR TRUJILLO-MILLÁN

Vol. 3, Número 3

Mayo-Junio 2025

www.biotmagazine.com

BIOTECNOLÓGICA MAGAZINE® año 2025, Vol. 3, No. 3, mayo-junio, es una publicación de divulgación, bimestral, editada por: Dra. Norma Y. Hernández Saavedra. http://biotmagazine.com, biotecnologicamagazine@gmail.com. Blvd. Constituyentes 1975, L19 MzB 165, Fracc. Campestre, La Paz, Baja California Sur, C.P. 23090, México. Tel. (612) 12 40674. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2024-022911435400-102, ISSN: 2992-863X; ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. El contenido de los artículos y comunicaciones es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja de manera alguna el punto de vista del Editor ni del Consejo Editorial Fundador. Queda prohibida la reproducción total o parcial del contenido por cualquier medio sin la autorización expresa del Consejo Editorial Fundador.

Crédito Fotografía Portada: Issaurinko a través de canva.
Edición gráfica editorial y página web: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez.

BiotecnoLógica® Magazine

Revista digital de divulgación científica.

BiotecnoLógica *Magazine* es la revista en línea de divulgación biotecnológica dirigida a empresas, investigadores, estudiantes y a todos los que sientan curiosidad por esta innovadora área científica y tecnológica.

BiotecnoLógica *Magazine* publica artículos en el campo de la biotecnología y ciencias afines. Publica editoriales (mensaje de el o los editores), artículos, notas cortas, fotografías, infografías, y noticias de actualidad en áreas gubernamentales, académicas, empresariales e investigaciones destacadas en el campo de la biotecnología, ciencias biológicas, ciencias de la vida, y ciencias ambientales, acuícolas, agropecuarias, veterinarias y ciencias médicas y biofarmacéuticas.

ORGANISMO RESPONSABLE

BiotecnoLógica Magazine

EDITORA

Dra. Norma Yolanda Hernández Saavedra

CONSEJO EDITORIAL FUNDADOR

Dra. Norma Yolanda Hernández Saavedra
Dr. Felipe Ascencio Valle
Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

EDITOR EJECUTIVO

Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

EDITORES ASOCIADOS

Dra.Ana G. Reyes Alvarado- Biotecnología agrícola e industrial.
Dr. Fausto Valenzuela Quiñonez - Bioinformática
Dr. Gerzaín Avilés Polanco - Biotecnología+Sociedad+Economía+Gobernanza.
Dra. María Goretty Caamal Chan - Biotecnología ambiental.
Dra. Martha Patricia Hernández Cortés - Biotecnología de alimentos-educación

biotecnologicamagazine@gmail.com
www.biotmagazine.com
Facebook @biotecnoLogicamagazine
Instagram biotecnologicamagazine
Threads biotecnologicamagazine

ÍNDICE

VI **EDITORIAL**

1 ***Brotes de Influenza Aviar A: La Interconexión entre Salud Animal, Humana y el Futuro de la Seguridad Alimentaria***
Felipe Ascencio

11 ***La ciencia que hace morir al cáncer: Estrategias desde el laboratorio***
Carlos Alberto García Torres, Brenda Lizbeth Arroyo Reyes, Plácido Zaca Morán

19 ***Biodiesel, hacia un futuro energético más verde***
Abraham Loera-Muro[1*], Goretty Caamal-Chan[1,] Ana Reyes[2].

28 ***¿Puede ayudarnos el café a prevenir el cáncer? Lo que dice la ciencia***
Norma Patricia Silva-Beltrán[1,2*], Nohemi Gámez-Meza[3], Luis Angel Medina- Juárez[3].

34 ***Biotecnología Azul: El poder oculto de la mucosidad de los pulpos***
Macario Savin Amador, Liliana Hernández Olalde, Oscar Trujillo-Millán

42 ***El colágeno más allá de los cosméticos: la piel de los peces es una fuente eficiente, segura y sostenible***
Norma Y. Hernández Saavedra

53 ***Innovaciones en Acuicultura: Hongos y sus Compuestos Bioactivos***
Felipe Ascencio

64 ***Los radicales libres y ¿cómo disminuir sus efectos?***
Jorge Luis Hernández Vicencio, Yazmín Hernández Díaz, Arath de la Torre Moreno

69 ***Día Mundial de los Océanos: Las 10 nuevas especies marinas más destacadas del 2024***
Norma Y. Hernández Saavedra

80 ***En laberintos de cuevas de coral***
Arturo Sánchez Paz

EDITORIAL

Estimad@s Lector@s,

En este tercer número de Biotecnológica Magazine, volvemos a reunir voces, descubrimientos y reflexiones que reflejan el pulso vivo de la ciencia contemporánea y su capacidad transformadora. Lo hacemos desde múltiples frentes: la salud humana y animal, la biotecnología azul, la sostenibilidad energética y alimentaria, la exploración de nuevas moléculas, y la profunda relación —a veces olvidada— que mantenemos con el planeta y sus criaturas.

Abrimos con una advertencia urgente: **el brote de influenza aviar A (H5N1**) que cobró la vida de una niña en Durango. Este caso no es solo una tragedia individual, sino un recordatorio de la interconexión entre salud animal, humana y ambiental, y de la necesidad de fortalecer nuestros sistemas de vigilancia y educación pública.

Desde los laboratorios de biomedicina, otro artículo nos confronta con el lado oscuro de la biología: **las células cancerosas que se niegan a morir.** La investigación sobre mecanismos de muerte celular programada nos muestra caminos prometedores hacia terapias más eficaces, menos invasivas, y profundamente humanas.

Y si hablamos de futuro, no podemos ignorar el tema energético. En este número destacamos al **biodiésel** como una alternativa viable a los combustibles fósiles, con el potencial de reducir significativamente las emisiones contaminantes. Este tema se complementa con el enfoque en la acuicultura sostenible mediante **hongos y compuestos bioactivos**, y el uso emergente de **colágeno de origen marino**, que promete revolucionar la medicina regenerativa con soluciones seguras y sostenibles.

En el ámbito de la salud preventiva, analizamos de forma crítica los posibles efectos del café en la **prevención del cáncer**, y el impacto nocivo de los **radicales libres** sobre nuestras células, destacando el rol de los antioxidantes naturales como defensa accesible para la población general.

Además, celebramos la **diversidad marina** con la lista anual de las 10 nuevas especies más destacadas, recordándonos cuánto queda por descubrir bajo la superficie del océano, y el invaluable trabajo de los taxónomos, guardianes del conocimiento biológico que, en cada nueva especie, nos revelan una parte oculta del planeta.

Finalmente, cerramos con una invitación profunda a la reflexión. En nuestra sección Filosofando, el texto **"En laberintos de cuevas de coral"** nos recuerda que somos solo una especie más entre millones, coexistiendo en esta roca azul que gira en la inmensidad del universo. La ciencia, en este sentido, no es solo una herramienta para transformar el mundo, sino un espejo que nos obliga a mirar nuestra responsabilidad en él.

Este número es un testimonio de cómo la biotecnología —en todas sus formas— puede ayudarnos a comprender mejor la vida, cuidarla y vivirla con mayor conciencia. Esperamos que disfruten la lectura tanto como nosotros disfrutamos compartirla con ustedes.

Consejo Editorial Fundador
Biotecnológica Magazine

Revista en línea de divulgación biotecnológica
www.biotmagazine.com

Artículos

Brotes de Influenza Aviar A: La Interconexión entre Salud Animal, Humana y el Futuro de la Seguridad Alimentaria

Felipe Ascencio
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
ascencio@cibnor.mx

Tema: México ha confirmado su primer caso humano de influenza aviar A (H5N1). Este caso se reportó el 1 de abril de 2025 y corresponde a una niña de tres años originaria de Durango, quien lamentablemente falleció el 8 de abril de 2025. Es importante que la población esté informada sobre cómo se transmite esta enfermedad y las medidas preventivas que se pueden tomar.

Introducción

El 1 de abril de 2025, la Secretaría de Salud, en colaboración con la SEMARNAT y la Secretaría de Agricultura, confirmó el primer caso humano de influenza aviar A (H5N1) en México. Se trataba de una niña de tres años que residía en el estado de Durango. La Secretaría de Salud ha comunicado a la población que, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el riesgo para la salud pública asociado a este virus se considera bajo para la población en general. Por lo tanto, el consumo de carne de pollo o huevos bien cocidos no representa un peligro para la salud humana. La influenza zoonótica es una enfermedad que puede transmitirse de aves u otros animales a los humanos. Sin embargo, hasta ahora, no se ha encontrado evidencia de transmisión sostenida de persona a persona. La Secretaría de Salud sugiere buscar atención médica si se presentan síntomas como fiebre, conjuntivitis (picazón o enrojecimiento ocular), tos, dolor de garganta, congestión nasal, dificultad para respirar, dolor de cabeza, vómitos, diarrea, sangrado o alteraciones en el estado de conciencia después de haber estado en contacto con aves u otros animales enfermos o fallecidos (Tabla 1).

2. ¿Qué tan común es la influenza aviar A (H5N1) en otros países?

La influenza aviar A (H5N1) ha sido documentada en diversos países a nivel mundial (Fig. 1). Aunque la transmisión a humanos es poco frecuente, el virus está ampliamente presente en aves, lo que mantiene el riesgo de transmisión zoonótica. Desde que comenzaron los registros de la enfermedad en el 2003 y hasta enero de 2025, la OMS ha informado sobre 964 casos de H5N1 en humanos, con una tasa de letalidad del 48%, lo que equivale a 466 muertes en 24 países (OPS/OMS, 2025).

El virus ha sido identificado en aves silvestres y domésticas en múltiples naciones, lo que ha resultado en brotes significativos en Asia, Europa y América. En la región de las Américas, entre 2022 y febrero de 2025, se han reportado 4,713 brotes en aves (19 países y territorios) y, durante este mismo período, se han registrado en la región 74 casos de H5N1 en humanos, siendo la mayoría en Estados Unidos (71 casos) y solo un caso en Canadá (OPS/OMS, 2025). Además, Chile y Ecuador han reportado algunos casos aislados de la H5N1 en humanos, mientras que en Europa y Asia, los informes

doi.org/10.5281/zenodo.15869832

Tabla 1. Datos generales de la Influenza A, H5N1 (CDC, 2025).

Origen	El H5N1 se identificó por primera vez en 1996 en gansos en China y ha circulado en diversas poblaciones de aves desde entonces. Los brotes en aves domésticas han sido comunes, especialmente en Asia.
Agente causal	El virus de la influenza A (H5N1) pertenece a la familia Orthomyxoviridae. Es un subtipo de virus de influenza aviar altamente patógeno, caracterizado por las proteínas de superficie hemaglutinina tipo 5 (H5) y neuraminidasa tipo 1 (N1). Su genoma de ARN segmentado facilita mutaciones y reordenamientos genéticos, lo que contribuye a su potencial pandémico.
Transmisión	La transmisión entre aves es eficiente, pero la transmisión a humanos es rara y generalmente ocurre tras el contacto directo con aves infectadas o sus secreciones. La transmisión humana es rara y no sostenida. Casos esporádicos ocurren tras exposición intensa, pero no hay evidencia de transmisión eficiente entre humanos.
Síntomas en humanos	Cuando los humanos se infectan, pueden experimentar síntomas similares a los de la gripe estacional, como fiebre, tos, dolor de garganta y dificultad para respirar. Sin embargo, puede llevar a complicaciones graves, incluyendo neumonía y síndrome de dificultad respiratoria aguda.
Diagnóstico	El RT-PCR es el método estándar para detectar ARN viral en muestras respiratorias (hisopado nasal/faríngeo).
Tratamiento	Antivirales (Inhibidores de neuraminidasa): Oseltamivir (oral) y zanamivir (inhalado), ideales dentro de las 48 horas posteriores al inicio de síntomas; Baloxavir (inhibidor de la polimerasa) bajo investigación para H5N1; y cuidados de soporte, Oxigenoterapia, manejo de fluidos, ventilación mecánica en casos graves.
Tasa de mortalidad	Aunque la infección humana es infrecuente, tiene una alta tasa de mortalidad cuando ocurre, lo que ha llevado a la vigilancia constante de este virus.
Prevención	La vacunación de aves y el control de su población son medidas clave para prevenir brotes. Para los humanos, evitar el contacto con aves enfermas y practicar buena higiene son esenciales.
Vigilancia y tratamiento	Los casos humanos se tratan con antivirales como oseltamivir (Tamiflu), pero la resistencia puede ser un problema. La vigilancia continua es crucial para detectar cualquier cambio en la virulencia del virus que pudiera aumentar el riesgo para los humanos.

sobre casos en humanos son más frecuentes en Asia, particularmente China, Indonesia y Vietnam. Aunque menos comunes en Europa, también se han registrado algunos brotes entre aves y casos humanos (OPS/OMS, 2025).

La Secretaría de Salud cuenta con una reserva estratégica de 40 mil tratamientos contra la H5N1 (Oseltamivir), y hace las siguientes recomendaciones a la población:

- Lavarse las manos de forma frecuente con agua y jabón o soluciones a base de alcohol al 70 por ciento.
- Utilizar cubrebocas en caso de síntomas respiratorios y ventilar espacios.
- Cubrir la boca y nariz al toser o estornudar.
- Lavar las manos antes de manipular alimentos cocidos y después de manipular alimentos crudos.
- Cocer adecuadamente carne de pollo y huevo (a una temperatura mayor a 70°C)
- No utilizar los mismos utensilios para manipular alimentos crudos y cocidos.
- Evitar tocar o acercarse a animales silvestres.

- INo manipular o recoger animales muertos.
- No tocar aves o animales de corral enfermos o muertos por causas desconocidas.
- Utilizar guantes, cubre bocas y ropa protectora si se trabaja en granjas o mataderos y se tiene contacto con aves u otros animales, sus productos y desechos.
- Vigilar posibles datos de enfermedad o muerte anormal en animales de granja o traspatio, y notificarlo inmediatamente a las autoridades (Secretaría de Salud, 2025).

sos) que pueden ser portadoras asintomáticas, facilitando la dispersión geográfica. El contacto directo o indirecto con aves silvestres introduce el virus en granjas avícolas, donde causa alta mortalidad. Se han reportado casos en zorros, focas y humanos, generalmente por contacto estrecho con aves infectadas. El virus persiste en agua fría contaminada con heces, lo que favorece su transmisión en hábitats acuáticos.

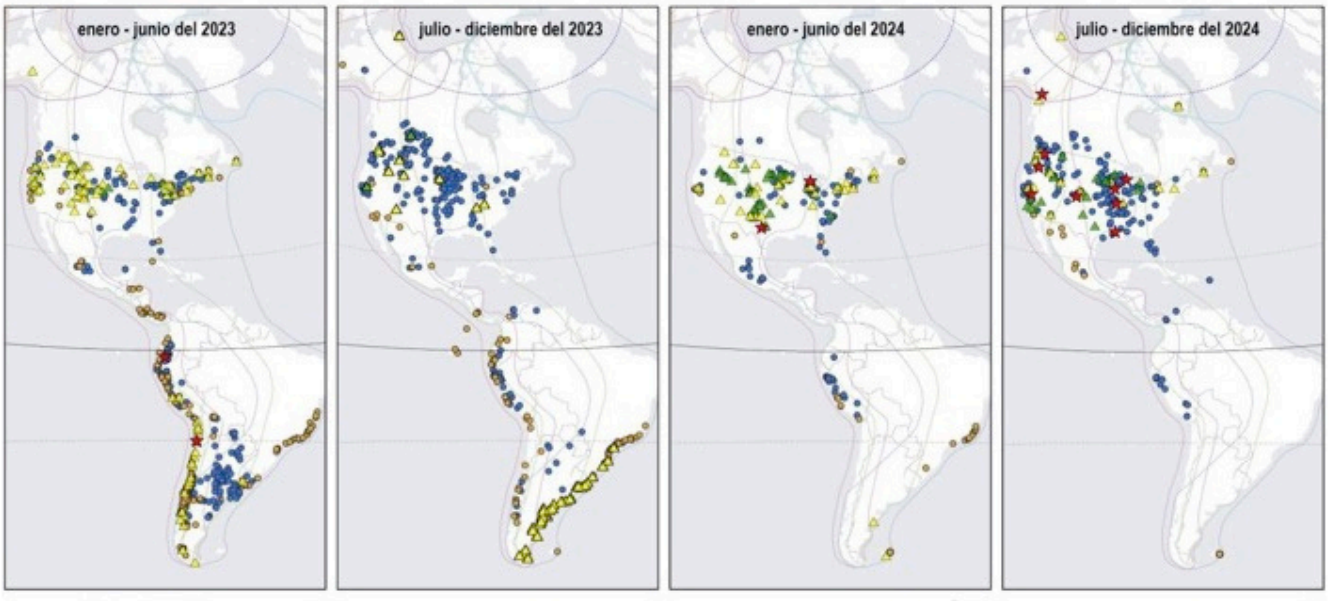


Figura 1. Histórico de brotes de influenza aviar y principales rutas migratorias de aves silvestres por tipo de animal durante 2023 y 2024 en la Región de las Américas. Circulo azul: Aves de corral o aves domésticas; Circulo amarillo: Aves silvestres; Triángulos verdes: Mamíferos domésticos; Amarillos: Mamíferos silvestres; Estrellas rojas: Influencia aviar – Casos humanos (Modificado de OPS/OMS, 2025).

3. ¿Cómo afecta la influenza aviar A (H5N1) a los animales domésticos?

El virus H5N1 es un subtipo de influenza A altamente patógeno que afecta principalmente a aves (Fig. 2), aunque puede infectar mamíferos y humanos. Su ecología está ligada a reservorios naturales, en donde se incluye a aves acuáticas migratorias (como patos y gan-

La persistencia del virus H5N1 se debe principalmente a la circulación en aves silvestres, quienes con sus rutas migratorias conectan regiones, permitiendo la reinfección de áreas previamente controladas. Por otro lado, en los sistemas de producción intensiva de aves con bioseguridad deficiente facilitan brotes recurrentes, o por un mecanismo de

rearreglo genético ocurre una coinfección con otros virus de influenza aviar generando nuevas variantes, evadiendo la inmunidad. Además, el H5N1 sobrevive hasta 30 días en agua a 0 °C, pero se inactiva rápidamente a temperaturas altas.

La propagación del H5N1 ocurre principalmente por contacto directo con heces, secreciones respiratorias o superficies contaminadas en granjas o mercados de aves vivas, por vía aérea debido a aerosoles en ambientes cerrados, o por un mecanismo de replicación viral mediado por la hemaglutinina (HA) del H5N1 que se une a receptores α-2,3-siálicos en tracto respiratorio y digestivo de aves, facilitando infección sistémica, o a los receptores α-2,3 que son escasos en vías respiratorias superiores humanas, reduciendo el riesgo de contagio interhumano (CDC, 2025).

prácticas de higiene mientras se evita el contacto directo con aves silvestres o ambientes contaminados (CDC, 2025).

Los signos de influenza aviar en mascotas pueden incluir: 1) *Problemas respiratorios* como secreción nasal y ocular, tos y estornudos; 2) *Síntomas neurológicos* como convulsiones, falta de coordinación, temblores y ceguera y 3) *Otros síntomas* como fatiga, fiebre y pérdida de apetito. Aunque es inusual, los animales domésticos infectados podrían funcionar como portadores del virus hacia los humanos. El riesgo de transmisión zoonótica sigue siendo bajo, pero no se puede descartar completamente, sobre todo si hay un contacto cercano con mascotas infectadas. Para proteger a los animales domésticos y minimizar riesgos, es fundamental evitar que consuman alimentos crudos o leche no pasteurizada, no permitir que gatos y perros pasen tiempo sin supervisión al aire libre, y mantener buenas

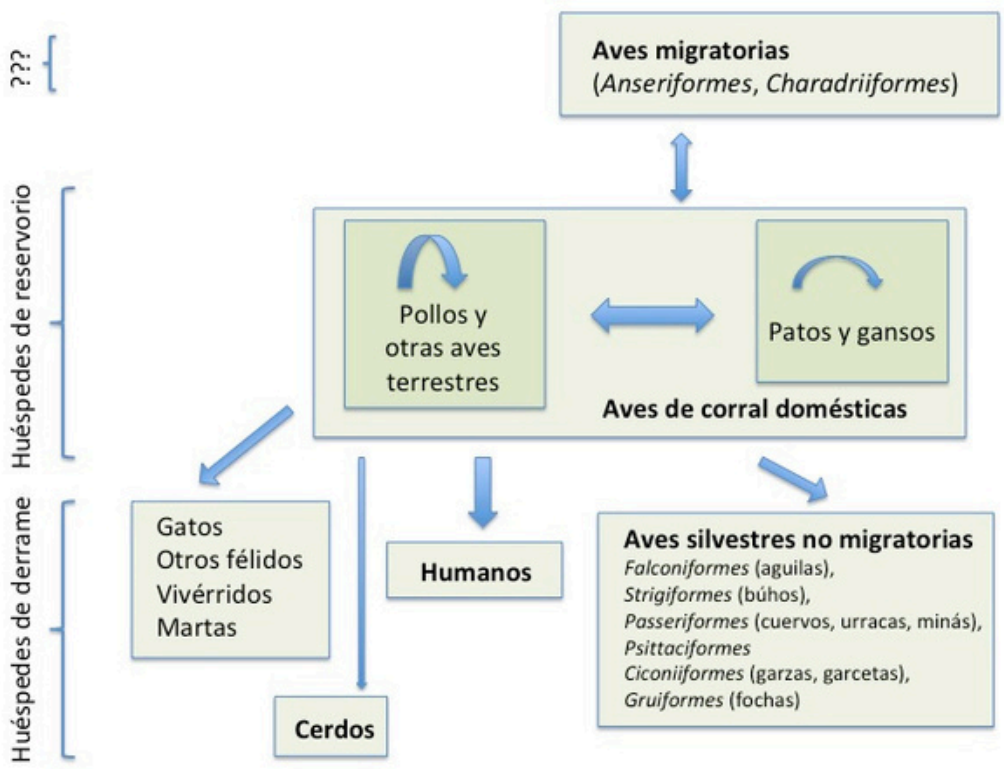


Figura 2. Ecología, mantenimiento y propagación de los virus H5N1 (Tomado de Peiris et al., 2007).

doi.org/10.5281/zenodo.15869832

4. Enfoque Una Salud para anticipar brotes de influenza A (H5N1)

El modelo de Una Salud (One Health) para anticipar brotes de H5N1 se basa en la integración de la información sobre la salud de humanos, animales y del medio ambiente, lo que permite mejorar tanto la predicción como la respuesta ante estos brotes (Fig. 3); este enfoque es esencial para el control de enfermedades zoonóticas como el H5N1. Los métodos y estrategias clave para implementar el enfoque Una Salud se pueden resumir de la siguiente manera:

- *Metodologías basadas en datos*: La utilización de bases de datos diagnósticas clínicas y técnicas estadísticas para identificar anomalías en enfermedades similares a la influenza puede facilitar la detección de posibles brotes. Los enfoques de aprendizaje por conjuntos han mostrado una alta precisión en la predicción de brotes, respaldada por fuentes externas como Google Flu Trends y datos de vigilancia proporcionados por la OMS (Du y Pang, 2021).
- *Modelos basados en grafos*: Las redes dinámicas de significancia de grafos virtuales (DVGSN) tienen la capacidad de aprender continuamente a partir de datos históricos sobre infecciones, sin restricciones temporales, lo que proporciona información valiosa para entender pandemias y es fundamental para la preparación en salud pública (Zhang et al., 2023).
- *Aprendizaje automático y profundo*: Los modelos híbridos que combinan redes neuronales de memoria a largo plazo (LSTM) con algoritmos genéticos pueden predecir eficazmente los brotes de influenza al abordar las características no lineales dentro de los datos. Estos modelos tienden a superar a los métodos estadísticos convencionales en cuanto a la predicción de picos y cronología de los brotes (Kara, 2021; Zhang y Nawata, 2017).
- *Pronóstico de transmisión espacial*: Al emplear datos sobre movilidad humana junto con modelos metapoblacionales, es posible prever el inicio de brotes locales con semanas de anticipación, lo que ofrece un tiempo crítico para implementar intervenciones en salud pública (Pei et al., 2018).
- *Vigilancia de aguas residuales*: El análisis de aguas residuales para identificar marcadores del virus influenza puede proporcionar alertas tempranas sobre brotes, como se ha evidenciado con la detección de marcadores H5 antes de las confirmaciones oficiales en casos tanto animales como humanos (Zulli et al., 2025).

5. Efectos económicos y sociales de la influenza A (H5N1) y sus repercusiones en la salud pública y la seguridad alimentaria

El virus de la influenza H5N1 tiene un impacto considerable tanto en el ámbito económico como social, afectando a la salud pública y la seguridad alimentaria a nivel global. Este virus representa un riesgo significativo, dado su potencial para infectar diversas especies, incluidos los seres humanos, además de su gran capacidad para desencadenar pandemias (Fig. 4).

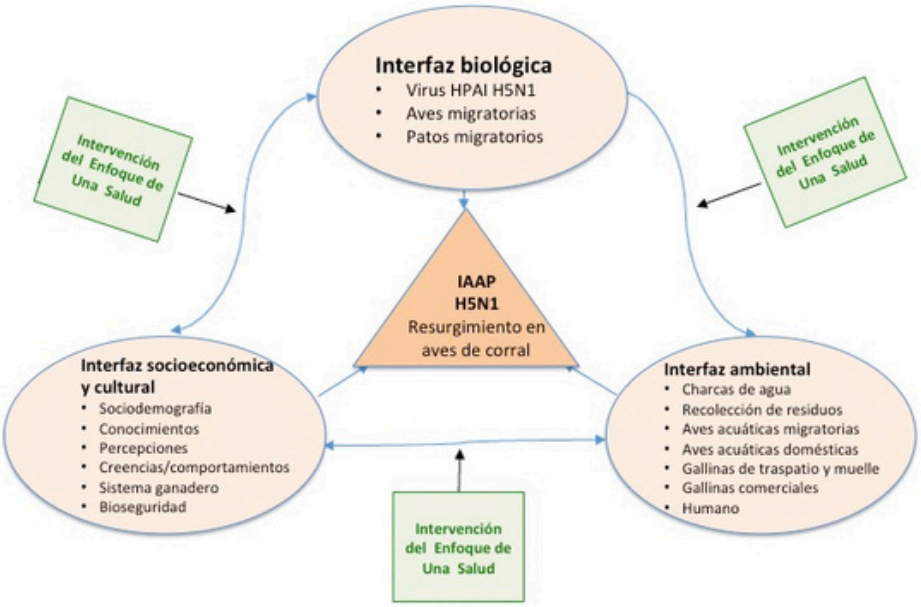


Figura 3. Modelo conceptual del marco "Una Salud" para el resurgimiento de la influenza aviar altamente patógena (IAAP) H5N1 en la interfaz entre humanos, aves y medio ambiente en aves de corral y los puntos de intervención. El concepto proporciona un marco para el desarrollo de capacidades en torno a la IAAP zoonótica y su mitigación mediante un enfoque de "Una Salud", considerando las actividades socioculturales y económicas (Fuente Alhaji et al., 2023).

5.1 Efectos económicos

En naciones con ingresos bajos y medios, la carga económica asociada a la influenza se traduce en gastos médicos directos y pérdidas importantes en productividad, lo que repercute negativamente en el desarrollo económico general (De Francisco et al., 2015). Aunque en Estados Unidos las pérdidas potenciales del PIB debido a brotes de influenza podrían ascender a miles de millones de dólares, la vacunación podría mitigar estas pérdidas (Prager et al., 2017). Además, el H5N1 ha llevado al sacrificio de millones de aves de corral, lo que impacta la seguridad alimentaria global, especialmente en las zonas más vulnerables (Lewis y Beer, 2024). La aparición del virus en ganado lechero y otros mamíferos agrava aún más los problemas relacionados con la seguridad alimentaria y la estabilidad económica (Yun, 2024; Webby y Uyeki, 2024).

5.2 Efectos sociales

El potencial zoonótico del H5N1 genera serias inquietudes en términos de salud pública, ya que las infecciones humanas pueden resultar en enfermedades graves e incluso fatales (Peiris et al., 2007; Tran et al., 2004). La habilidad del virus para cruzar barreras interspecies incrementa el riesgo de una pandemia (Shi y Gao, 2021). En países como Nigeria, prácticas socioculturales como el intercambio de aves y la falta de medidas adecuadas de bioseguridad facilitan la propagación del virus, lo que resalta la necesidad de un enfoque integral de "Una sola salud" para mejorar tanto la salud pública como la seguridad alimentaria (Alhaji et al., 2023).

doi.org/10.5281/zenodo.15869832

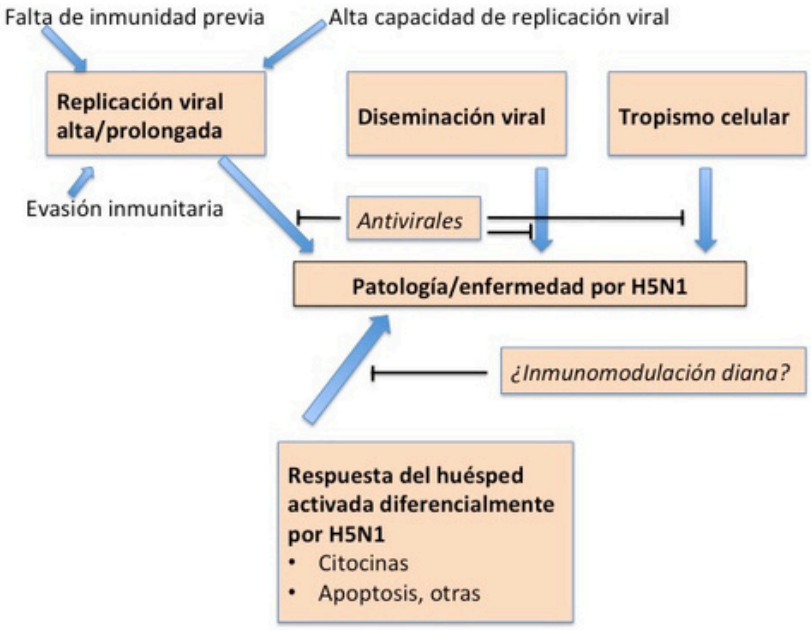


Figura 4. Mecanismos de patogénesis de la enfermedad humana Influenza aviar H5N1 (Fuente Peiris et al. 2007).

5.3 Repercusiones para la salud pública y la inocuidad alimentaria.

Es fundamental fortalecer la vigilancia y asegurar el cumplimiento riguroso de las normativas de inocuidad alimentaria para prevenir infecciones humanas y gestionar brotes (Yun, 2024; Webby y Uyeki, 2024). La posibilidad de recombinación genética con virus humanos enfatiza la urgencia de aplicar medidas efectivas de contención (Tran et al., 2004). La propagación del H5N1 en diversas áreas como África y Asia subraya la importancia de una colaboración internacional en materia de vigilancia y control del virus para salvaguardar tanto la salud pública como garantizar la inocuidad alimentaria (Letsholo et al., 2022).

6. Situación Actual en Investigación Clínica, Desafíos y Perspectivas sobre la Influenza Aviar A (H5N1)

La investigación relacionada con la influenza H5N1 se enfoca en entender su modo de transmisión, la creación de vacunas y la atención a los riesgos que representa para la salud pública. Este virus altamente patógeno plantea retos considerables debido a su capacidad para provocar pandemias y su elevada tasa de mortalidad.

6.1 Investigación clínica sobre el H5N1

Transmisión y evolución: El H5N1 ha logrado expandirse a nivel global, afectando tanto a aves como a humanos, con una tasa de mortalidad alta entre los infectados. La habilidad del virus para mutar y recombinarse continúa generando obstáculos en su control y prevención (Charostad et al., 2023; Gambotto et al., 2008; Forrest y Webster, 2010).

doi.org/10.5281/zenodo.15869832

- Desarrollo de vacunas: Se están llevando a cabo esfuerzos para crear vacunas efectivas, incluyendo aquellas basadas en virus vivos atenuados y partículas similares a virus. Estas iniciativas buscan ofrecer protección contra cepas tanto homólogas como heterólogas, con avances en los métodos de producción que mejoran la escalabilidad y efectividad (Steel, 2011; Melidou et al., 2009).
- Descubrimiento de fármacos antivirales: La investigación se concentra en identificar nuevos compuestos antivirales que apunten al dominio de unión CAP PB2 de la polimerasa H5N1. Se ha demostrado que algunos compuestos naturales tienen potencial como agentes antivirales, lo que abre nuevas posibilidades para tratamientos (Alam et al., 2024).

6.2 Desafíos en la investigación del H5N1

- Resistencia y eficacia de los fármacos: Los tratamientos antivirales convencionales enfrentan problemas como la resistencia y una eficacia limitada, lo cual subraya la necesidad de descubrir nuevos compuestos (Alam et al., 2024).
- Riesgos para la salud pública: La posibilidad de que el H5N1 desencadene una pandemia similar a la de 1918 sigue siendo una preocupación significativa, lo que resalta la urgencia de implementar estrategias efectivas de vigilancia y control (Gambotto et al., 2008; Forrest y Webster, 2010).
- Preocupaciones sobre investigación de doble uso: Los estudios sobre transmisibilidad y ganancia de función generan inquietudes éticas y de seguridad, lo que requiere un análisis cuidadoso de los riesgos frente a los beneficios (Fauci, 2012; Osterholm y Relman, 2012).

6.3 Orientaciones futuras

- ***Vigilancia y control***: Es vital reforzar la vigilancia en poblaciones de aves silvestres y domésticas para monitorear y controlar la propagación del H5N1 (Amer et al., 2021; Forrest y Webster, 2010).
- ***Análisis genómico y proteómico***: Un estudio exhaustivo de las interacciones entre el virus y sus hospedadores puede facilitar el diseño de nuevas estrategias de control e impulsar el desarrollo de hospedadores genéticamente resistentes (Forrest y Webster, 2010).
- ***Participación pública y políticas***: Es fundamental mantener una comunicación clara y desarrollar políticas adecuadas para abordar el doble uso de la investigación sobre el H5N1, garantizando así la seguridad pública (Fauci, 2012; Osterholm y Relman, 2012).

7. Conclusiones

El enfoque "Una Salud" para prever brotes del H5N1 utiliza modelos avanzados basados en datos junto con aprendizaje automático, pronósticos espaciales y métodos innovadores de vigilancia como el monitoreo de aguas residuales. Estas estrategias integradas mejoran nuestra capacidad para anticipar y responder a brotes, optimizando los resultados en salud pública mediante pronósticos precisos. El virus H5N1 representa una amenaza compleja que impacta las economías, la salud pública y la seguridad alimentaria. Una gestión eficaz requiere vigilancia global, estrategias de vacunación robustas y mejores medidas de bioseguridad para mitigar sus efectos económicos y sociales. La investigación sobre el H5N1 es esencial para comprender su dinámica de transmisión, desarrollar vacunas

efectivas y enfrentar los desafíos en salud pública. Los esfuerzos continuos en vigilancia, descubrimiento de fármacos y prácticas éticas son cruciales para reducir los riesgos asociados con este virus altamente patógeno.

8. Referencias

Alam, P., et al. 2024. Understanding the Stability and Dynamics of Influenza A H5N1 Polymerase PB2 CAP-Binding Domain in Complex with Natural Compounds for Antiviral Drug Discovery. Archives of Biochemistry and Biophysics, 110148.

Alhaji, N., et al. 2023. An assessment of the highly pathogenic avian influenza resurgence at human-poultry-environment interface in North-central Nigeria: Sociocultural determinants and One Health implications. One Health 16.

Amer, F., et al. 2021. Temporal Dynamics of Influenza A(H5N1) Subtype before and after the Emergence of H5N8. Viruses 13.

CDC 2025. Influenza aviar en mascotas y otros animales. https://espanol.cdc.gov/bird-flu/risk-factors/bird-flu-in-pets.html

Charostad, J., et al. 2023. A comprehensive review of highly pathogenic avian influenza (HPAI) H5N1: An imminent threat at doorstep. Travel Medicine and Infectious. Disease, 102638.

De Francisco, N., et al. 2015. A systematic review of the social and economic burden of influenza in low- and middle-income countries. Vaccine 33(48):6537-6544.

Du, L., Pang, Y. 2021. A novel data-driven methodology for influenza outbreak detection and prediction. Scientific Reports.

Fauci, A. 2012. Research on Highly Pathogenic H5N1 Influenza Virus: The Way Forward. mBio 3.

Forrest, H., Webster, R. 2010. Perspectives on influenza evolution and the role of research. Animal Health Research Reviews, 11: 3-18.

Gambotto, A., et al. 2008. Human infection with highly pathogenic H5N1 influenza virus. The Lancet, 371: 1464-1475.

Kara, A. 2021. Multi-step influenza outbreak forecasting using deep LSTM network and genetic algorithm. Expert Syst. Appl. 180: 115153.
https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2021.115153

Letsholo, S., et al. 2022. Emergence of High Pathogenicity Avian Influenza Virus H5N1 Clade 2.3.4.4b in Wild Birds and Poultry in Botswana. Viruses, 14.

Lewis, N., Beer, M. 2024. Stop H5N1 influenza in US cattle now. Science 385: 123-123.

Melidou, A., et al. 2009. Influenza A(H5N1): an overview of the current situation. Euro Surveillance: European Communicable Disease Bulletin, 14:20.

Organización Panamericana de la Salud / Organización Mundial de la de la Salud (OPS/OMS). 2025. Actualización Epidemiológica: Influenza aviar A(H5N1) en la Región de las Américas, 4 de marzo del 2025. Washington, D.C.: OPS/OMS. (Última consulta mayo 7, 2025).

Osterholm, M., Relman, D. 2012. Creating a mammalian-transmissible A/H5N1 influenza virus: social contracts, prudence, and alternative perspectives. Journal of Infectious Diseases 205(11): 1636-163.

Pei, S., et al. 2018. Forecasting the spatial transmission of influenza in the United States. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115:2752-2757.

Peiris, J., et al., 2007. Avian Influenza Virus (H5N1): a Threat to Human Health. Clinical Microbiology Reviews 20 (24):267.

Prager, F., et al. 2017. Total Economic Consequences of an Influenza Outbreak in the United States. Risk Analysis 37.

Secretaria de Salud. 2025. Secretaría de Salud informa la detección del primer caso humano de influenza aviar A (H5N1), (Última consulta mayo 7, 2025).

Shi, W., Gao, G. 2021. Emerging H5N8 avian influenza viruses. Science, 372: 784-786.

Steel, J. 2011. New strategies for the development of H5N1 subtype influenza vaccines: progress and challenges. BioDrugs: clinical immunotherapeutics, biopharmaceuticals and gene therapy, 25(5):285-98.

Tran, T., et al. 2004. Avian influenza A (H5N1) in 10 patients in Vietnam. New England Journal of Medicine, 350(12):1179-1188.

Webby, R., Uyeki, T. 2024. An Update on Highly Pathogenic Avian Influenza A(H5N1) Virus, Clade 2.3.4.4b. Journal of Infectious Diseases, 230(3): 533–542

Yun, C. 2024. Unprecedented H5N1 outbreak: a rare cross-species influenza threat. Animal Bioscience 37: 1661-1663. https://doi.org/10.5713/ab.24.0560

Zhang, J., Nawata, K. 2017. A comparative study on predicting influenza outbreaks. Bioscience Trends, 11(5): 533-541.

Zhang, J., et al. 2023. Predicting influenza with pandemic-awareness via Dynamic Virtual Graph Significance Networks. Computers in Biology and Medicine 158:106807.

Zulli, A., et al. 2025. 309. Detection of hemagglutinin H5 influenza A virus sequence in municipal wastewater solids during an outbreak of avian influenza. Open Forum Infectious Diseases 12.



Sobre el autor

Dr. Felipe Ascencio
Investigador Titular D y profesor en el CIBNOR, SNII III. Responsable del Laboratorio de Patogénesis Microbiana. Loop: 264286; Scopus: 57247070500; ORCID: 0000-0003-3515-8708.

Cita:

Ascencio, F. (2025). Brotes de Influenza Aviar A: La Interconexión entre Salud Animal, Humana y el Futuro de la Seguridad Alimentaria. Biotecnológica Magazine, 3(3), 1-10. https://doi.org/10.5281/zenodo.15869832

La ciencia que hace morir al cáncer: Estrategias desde el laboratorio

Carlos Alberto García Torres1, Brenda Lizbeth Arroyo Reyes2*, Plácido Zaca Morán3

1Facultad de Ciencias Biológicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Avenida San Claudio y 18 Sur, C.P. 72570 Puebla, Puebla, México. carlos.garciato@alumno.buap.mx
2Instituto de Fisiología, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Prol. de la 14 Sur, C.P. 72592, Puebla, Puebla, México. brenda.arroyore@alumno.buap.mx
3Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ecocampus Valsequillo, Independencia O 2 Sur 50, C.P. 72960, Puebla, Puebla, México. placido.zaca@correo.buap.mx
*Autor para correspondencia

Tema: ¿Qué pasa cuando una célula cancerosa deja de obedecer las reglas y se vuelve inmortal? En este trabajo explicamos cómo, desde el laboratorio, los científicos activan mecanismos naturales de muerte celular —como la apoptosis, necroptosis y autosis— para detener el crecimiento del cáncer. Estos estudios, realizados en modelos *in vitro* (los experimentos en laboratorio), abren nuevas posibilidades para terapias más precisas y seguras.

¿Cómo mueren las células cancerosas? La ciencia detrás de una batalla silenciosa

El cáncer es una de las enfermedades más letales en el mundo. Pero ¿Por qué es tan difícil de detener? La razón está en cómo se comportan las células cancerosas: se multiplican rápidamente, de forma desordenada y sin respetar las reglas que mantienen el equilibrio en nuestro cuerpo. Es como si olvidaran su función en el cuerpo y se transformarán en células malignas que invaden tejidos cercanos y dañan órganos. Esta transformación puede deberse a factores genéticos o ambientales que alteran los mecanismos que normalmente regulan el crecimiento y muerte de las células.

Las células, como los organismos vivos, nacen, crecen, se reproducen y mueren. Pero cuando este ciclo natural se altera, las células pueden comenzar a dividirse sin control o evitar su propia muerte, lo que puede dar origen al cáncer.

Cuando una célula deja de funcionar correctamente, lo ideal es que muera de manera ordenada, sin causar daño a las células vecinas ni generar inflamación. Este proceso de muerte controlada es esencial para mantener el equilibrio de los tejidos en el cuerpo. Sin embargo, en las células cancerosas, este sistema de control está dañado. Es decir, las células cancerosas ya no responden a las señales que les indican cuándo deben morir. Por eso, una de las estrategias más prometedoras de la ciencia ha sido buscar formas de reprogramar estas células para que se destruyan a sí mismas, reactivando los mecanismos naturales de muerte. Entre estos mecanismos destacan tres tipos de muerte celular controlada: la apoptosis, la autosis y la necroptosis.

Ahora bien, ¿Cómo estudiamos esta enfermedad en el laboratorio sin poner en riesgo a nadie? Para entender cómo se comportan las células cancerosas, los científicos recurren a modelos *in vitro*, es decir, experimen-

doi.org/10.5281/zenodo.15869848

tos realizados fuera del cuerpo humano, en un laboratorio con condiciones controladas. Estos modelos permiten simular el entorno celular, observar cómo se comportan las líneas celulares cancerosas y estudiar la forma de hacer que mueran sin dañar a las células sanas. Gracias a esta herramienta, se pueden obtener resultados rápidos, reproducibles y seguros, antes de pasar a estudios clínicos en pacientes.

Entonces, ¿Cómo se destruyen a las células cancerosas sin afectar a las sanas? Los estudios *in vitro* permiten a los investigadores observar, paso a paso, lo que ocurre dentro de una célula cancerosa y buscar nuevas formas de atacar con precisión. Esta investigación es clave para entender el cáncer y diseñar terapias más efectivas.

¿Cuál es la mejor forma de morir?

Uno de los principales temas que se estudia en modelos *in vitro* es cómo las células mueren de manera natural cuando están dañadas, debido a que las células cuentan con varios mecanismos naturales para eliminar células dañinas sin afectar a las sanas. Uno de ellos es la **apoptosis**, una especie de "suicidio celular" que ocurre de forma ordenada y sin causar daños a su entorno. Este proceso ocurre de manera ordenada y evita que las células dañadas, envejecidas o defectuosas se acumulen en el cuerpo. Gracias a la apoptosis, los tejidos se mantienen saludables y en equilibrio (Figura 1). Sin embargo, en las células cancerosas, este mecanismo suele estar bloqueado. Algunas células activan proteínas que impiden su autodestrucción, mientras que otras desactivan las enzimas necesarias para iniciar el proceso. Estas enzimas, llamadas caspasas, actúan como tijeras moleculares que cortan proteínas dentro de la célula para iniciar su degradación.

Entonces, cuando la apoptosis no funciona bien, las células dañadas pueden seguir multiplicándose. Por este motivo, los tratamientos contra el cáncer buscan precisamente volver a activar este proceso natural de muerte celular. Pero cuando la apoptosis falla hay otros menos ordenados, pero igual de útiles.

Otro es la **necroptosis**, en la que la célula muere rompiendo su membrana de forma controlada, liberando su contenido sin generar una inflamación grave. Gracias a este control, es posible reducir los daños colaterales que normalmente acompañan a una inflamación intensa. Por esta razón, los científicos están explorando cómo activar la necroptosis de forma dirigida para eliminar células cancerosas sin afectar a las células vecinas sanas.

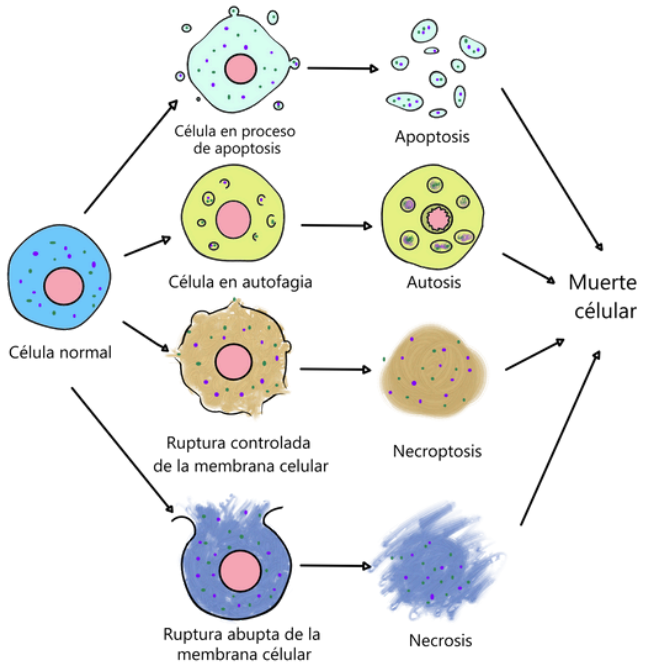


Figura 1. Comparación entre apoptosis, autosis, necroptosis y necrosis

Finalmente, existe la **autosis**, que sucede cuando un proceso llamado autofagia — el sistema de reciclaje celular — se activa por tiempo prolongado y no se autorregula adecuadamente y termina provocando la muerte de la célula. En condiciones normales, la autofagia ayuda a las células sanas a sobrevivir, especialmente en entornos adversos como privación de oxígeno o nutrientes (Figura 1). La autofagia comienza con la formación de una "burbuja" que envuelve lo que se necesita reciclar. Posteriormente, un organelo que contiene proteínas de degradación, llamado lisosoma, se une a esta burbuja para iniciar el proceso de degradación y reciclaje (Figura 2).

Estudiar estos mecanismos ayuda a los científicos a diseñar tratamientos que activen estas vías de muerte en las líneas celulares cancerosas.

Pero existe un tipo de muerte celular que a los científicos no les gusta nada: la necrosis. Es como una explosión dentro de la célula, que rompe su membrana de forma violenta, derrama todo su contenido y causa una inflamación descontrolada que puede dañar a las células sanas de alrededor. Por sus efectos caóticos, es un proceso que se busca evitar en los tratamientos contra el cáncer (Figura 1).

Los procesos controlados de muerte celular se han utilizado como enfoque en las terapias contra el cáncer y han permitido tener una mejor comprensión de cómo inhibir el crecimiento de las líneas celulares cancerosas disminuyendo efectos indeseables.

Para poder estudiar estos mecanismos de muerte celular con detalle y encontrar formas de reactivarlos en células cancerosas, los científicos necesitan modelos confiables que puedan manipular en el laboratorio. Para lograrlo las líneas celulares han sido una herramienta clave para avanzar en el conocimiento del cáncer.

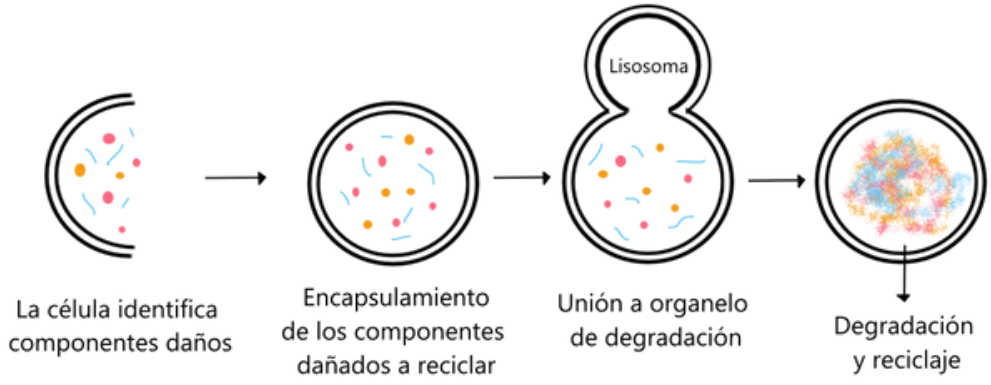


Figura 2. Etapas que conforman el proceso de la autofagia.

doi.org/10.5281/zenodo.15869848

Líneas celulares: los modelos invisibles que nos ayudan a entender el cáncer

A principios del siglo XX, el científico Ross Harrison dio un paso histórico. Logró mantener células vivas fuera de un organismo. En 1907, extrajo una pequeña parte del sistema nervioso de un embrión de rana y la colocó en una gota de linfa (líquido transparente que circula en nuestro cuerpo) sobre un portaobjetos. Al solidificarse, creó así el primer cultivo celular en suspensión. Gracias a este ingenioso montaje, pudo observar al microscopio cómo crecían las fibras nerviosas *in vitro*, es decir, fuera del cuerpo del animal (Figura 3). Desde ese experimento pionero, el cultivo celular se ha convertido en una herramienta importante en la biología moderna: permite estudiar enfermedades, probar medicamentos y, como en este caso, entender cómo mueren las líneas celulares cancerosas.

Con el paso del tiempo, el cultivo celular fue perfeccionándose. Al principio, uno de los mayores desafíos era mantener vivas a las células fuera del cuerpo durante pocas horas. Los primeros intentos usaban ingredientes naturales como plasma de pollo o extractos de embriones, pero estos eran difíciles de estandarizar y variaba mucho de un experimento a otro.

Fue hasta la década de 1950 que los científicos descubrieron qué nutrientes necesitan realmente las células para sobrevivir y multiplicarse. Ese avance permitió crear medios de cultivo más precisos, adaptados a cada tipo celular, lo que abrió la puerta a investigaciones más confiables y repetibles.

La mayoría de las células humanas obtenidas directamente de los tejidos tienen una vida limitada. Con el tiempo, tras acumular daños en su material genético, las células envejecen y dejan de dividirse. A esto se le llama senescencia celular. Y aunque las células siguen activas, ya no se dividen y cambian tanto en su forma como en su comportamiento, volviéndolas inviables para su estudio en el laboratorio. Para resolver esta limitación, los científicos han desarrollado técnicas que permiten "inmortalizar" las células. Esto no significa que vivan para siempre, pero sí que pueden dividirse una y otra vez sin morir como lo harían normalmente. Es como si les dieran una especie de "pase libre" para seguir funcionando sin envejecer rápido. Para lograrlo, los científicos usan ciertos cambios genéticos o toman células que ya tienen esa capacidad, como algunas células cancerosas. Esas células siguen vivas en laboratorios de todo el mundo y han ayudado a descubrir muchas cosas sobre enfermedades, vacunas y tratamientos.

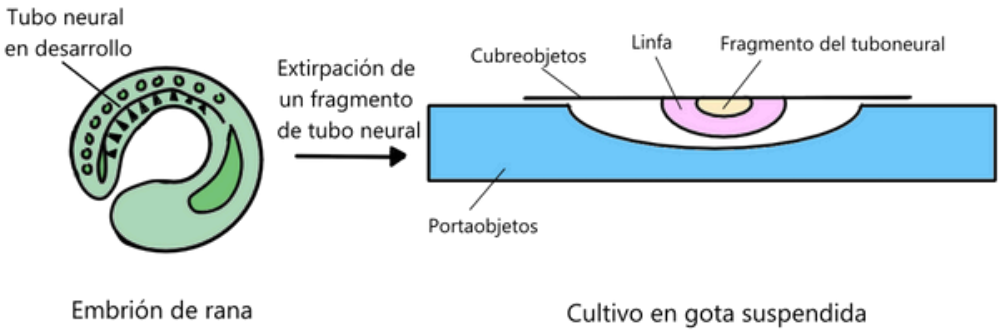


Figura 3. Diagrama del tubo neural de un embrión de rana en contacto con una gota de linfa.

doi.org/10.5281/zenodo.15869848

El estudio del cáncer es actualmente uno de los campos donde los cultivos celulares han demostrado mayor utilidad, ya que las líneas celulares cancerosas permiten investigar *in vitro* los mecanismos moleculares implicados en esta enfermedad y, en consecuencia, desarrollar tratamientos más efectivos.

Matar al cáncer sin dañar lo sano: cómo la ciencia programa la muerte celular

En el laboratorio, los científicos han buscado formas de eliminar las líneas celulares cancerosas sin dañar a las células sanas. Para lograrlo, estudian los distintos tipos de muerte celular y sus efectos. Estas investigaciones han permitido clasificar las estrategias en dos grandes grupos: las que usan compuestos químicos y las que emplean métodos físicos.

Por un lado, las terapias químicas incluyen sustancias naturales y compuestos sintéticos. Algunos extractos naturales, obtenidos de plantas, hongos o incluso de organismos marinos, han demostrado tener compuestos capaces de inducir apoptosis. Por ejemplo, extractos de *Hamelia patens*, *Dioon spinulosum* y *Gossypium schottii* han provocado apoptosis en líneas celulares de cáncer de nasofaringe, cuello uterino y células escamosas de tejidos (como piel, esófago y pulmones). Además, la shikonina, un compuesto extraído de raíces secas de *Lithospermum erythrorhizon*, ha demostrado activar necroptosis en células de cáncer de pulmón. Por su parte, extractos de esponjas y algas marinas, ricos en alcaloides y polisacáridos, han mostrado inducir apoptosis en células de cáncer colorrectal. Incluso, algunos compuestos naturales pueden activar autosis (Figura 4a). En paralelo, los fármacos diseñados en el laboratorio también han mostrado eficacia. Medicamentos como trametinib y palbociclib han demostrado inducir apoptosis en líneas celulares de cáncer de pulmón. Otro ejemplo interesante es el compuesto ABT-737, que bloquea proteínas que normalmente impiden la muerte celular, haciendo que las células de cáncer de ovario sean más sensibles al fármaco cisplatino, con lo cual se refuerza la apoptosis.

Por otro lado, las terapias físicas utilizan herramientas como la luz o el calor para atacar directamente a las líneas celulares cancerosas. Por ejemplo, ciertas nanopartículas —como las de oro, plata, zinc o diamantes— pueden acumularse dentro de las células tumorales. Al ser activadas con luz láser, generan calor desde el interior y provocan su autodestrucción (Figura 4b). Este enfoque, conocido como hipertermia localizada, busca eliminar solo las células dañinas induciendo apoptosis o autosis.

En particular, los nanodiamantes han demostrado ser eficaces para activar apoptosis en células de cáncer óseo, gracias a su capacidad de alterar componentes vitales como los lípidos y proteínas causando autosis al generar estrés interno, incluso sin necesidad de luz.

Aunque estas terapias son prometedoras, deben ser cuidadosamente ajustadas. Uno de los principales retos para los investigadores es lograr una dosis precisa de calor que destruya las líneas celulares cancerosas sin provocar necrosis, evitando buscar este tipo de muerte en un tratamiento oncológico.

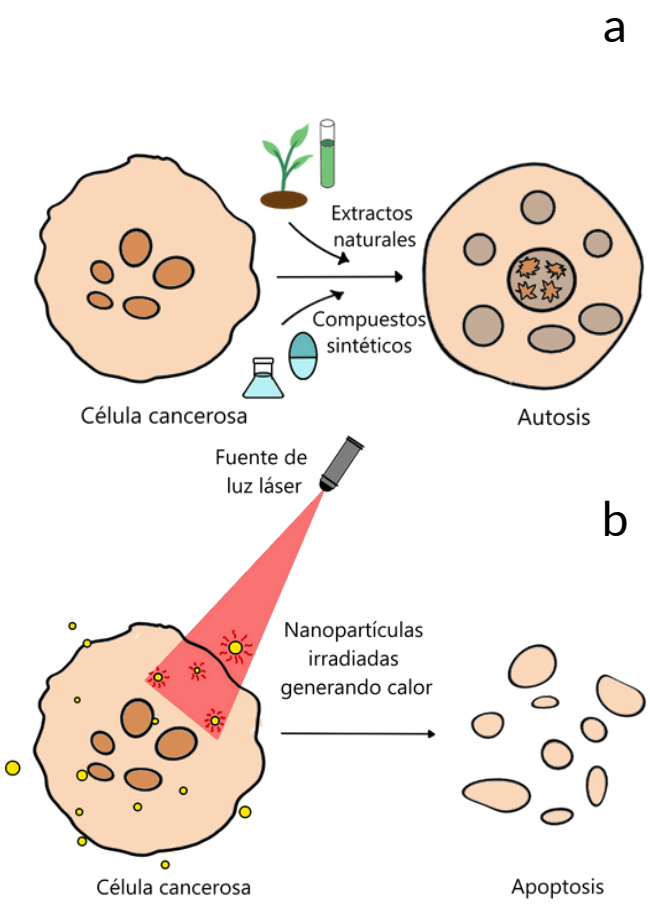


Figura 4. Célula cancerosa con múltiples núcleos a) en proceso de autosis inducida por tratamientos químicos. b) en proceso de apoptosis inducida por tratamientos físicos.

Conclusiones

Estudiar células cancerosas fuera del cuerpo —en modelos *in vitro*— ha sido de gran importancia para la humanidad al ayudar a entender cómo se regulan sus mecanismos de muerte celular. Gracias a estas investigaciones, se han identificado procesos como la apoptosis, necroptosis y autosis, que permiten eliminar células dañinas sin afectar a las sanas. Hoy sabemos que es posible inducir estos procesos con extractos naturales, fármacos o incluso usando luz láser y nanomateriales. Aunque los modelos *in vitro* tienen limitaciones, el trabajo conjunto entre distintas disciplinas está impulsando terapias más precisas y seguras, cada vez más cerca de ser aplicadas en pacientes.

Referencias

Aljabali, A. A. A., Obeid, M. A., Bakshi, H. A., Alshaer, W., Ennab, R. M., Al-Trad, B., Khateeb, W. Al, Al-Batayneh, K. M., Al-Kadash, A., Alsotari, S., Nsairat, H., & Tambuwala, M. M. (2022). Synthesis, Characterization, and Assessment of Anti-Cancer Potential of ZnO Nanoparticles in an In Vitro Model of Breast Cancer. *Molecules*, *27*(6). https://doi.org/10.3390/molecules27061827

Bai, L., Wu, Q., Zhang, X., & Zhao, Y. (2023). Autosis as a selective type of cell death. In *Frontiers in Cell and Developmental Biology* (Vol. 11). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fcell.2023.1164681

Castillo, J. (2013). Nanotubos de carbono en la terapia fototérmica contra el cáncer. *Innovaciencia*, *1*(1), 5–10. https://doi.org/10.15649/2346075X.209

Gong, Y., Fan, Z., Luo, G., Yang, C., Huang, Q., Fan, K., Cheng, H., Jin, K., Ni, Q., Yu, X., & Liu, C. (2019). The role of necroptosis in cancer biology and therapy. In *Molecular Cancer* (Vol. 18, Issue 1). BioMed Central Ltd. https://doi.org/10.1186/s12943-019-1029-8

Han, N., Li, J., & Li, X. (2022). Natural Marine Products: Anti-Colorectal Cancer In Vitro and In Vivo. In *Marine Drugs* (Vol. 20, Issue 6). MDPI. https://doi.org/10.3390/md20060349

Hanahan, D., & Weinberg, R. A. (2011). Hallmarks of cancer: The next generation. In *Cell* (Vol. 144, Issue 5, pp. 646–674). https://doi.org/10.1016/j.cell.2011.02.013

Ibrahim, M., Xue, Y., Ostermann, M., Sauter, A., Steinmueller-Nethl, D., Schweeberg, S.,

Krueger, A., Cimpan, M. R., & Mustafa, K. (2018). In vitro cytotoxicity assessment of nanodiamond particles and their osteogenic potential. *Journal of Biomedical Materials Research - Part A*, *106*(6), 1697–1707. https://doi.org/10.1002/jbm.a.36369

Keremidarska, M., Ganeva, A., Mitev, D., Hikov, T., Presker, R., Pramatarova, L., & Krasteva, N. (2014). Comparative study of cytotoxicity of detonation nanodiamond particles with an osteosarcoma cell line and primary mesenchymal stem cells. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, *28*(4), 733–739. https://doi.org/10.1080/13102818.2014.947704

Kim, H. J., Hwang, K. E., Park, D. S., Oh, S. H., Jun, H. Y., Yoon, K. H., Jeong, E. T., Kim, H. R., & Kim, Y. S. (2017). Shikonin-induced necroptosis is enhanced by the inhibition of autophagy in non-small cell lung cancer cells. *Journal of Translational Medicine*, *15*(1). https://doi.org/10.1186/s12967-017-1223-7

Kiraz, Y., Adan, A., Kartal Yandim, M., & Baran, Y. (2016). Major apoptotic mechanisms and genes involved in apoptosis. In *Tumor Biology* (Vol. 37, Issue 7, pp. 8471–8486). Springer Science and Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/s13277-016-5035-9

Li, X., Guo, Y., Xing, Z., Gong, T., Yang, L., Yang, T., Chang, B., Wang, X., Yu, B., & Guo, R. (2024). ABT-737 increases cisplatin sensitivity through the ROS-ASK1-JNK MAPK signaling axis in human ovarian cancer cisplatin-resistant A2780/DDP cells. *Oncology Reports*, *52*(3). https://doi.org/10.3892/or.2024.8781

Li, Z., Guo, D., Yin, X., Ding, S., Shen, M., Zhang, R., Wang, Y., & Xu, R. (2020). Zinc oxide nanoparticles induce human multiple myeloma cell death via reactive oxygen species and Cyt-C/Apaf-1/Caspase-9/Caspase-3 signaling pathway in vitro. Biomedicine and Pharmacotherapy, 122. https://doi.org/10.1016/j.biopha.2019.109712

Martínez-Torres, A. C., Uscanga-Palomeque, A. C., & Rodríguez-Padilla, C. (2016). Actividad citotóxica in vitro frente a células tumorales. In Investigación en plantas de importancia médica (pp. 269–312). OmniaScience. https://doi.org/10.3926/oms.318

Paskeh, M. D. A., Entezari, M., Clark, C., Zabolian, A., Ranjbar, E., Farahani, M. V., Saleki, H., Sharifzadeh, S. O., Far, F. B., Ashrafizadeh, M., Samarghandian, S., Khan, H., Ghavami, S., Zarrabi, A., & Łos, M. J. (2022). Targeted regulation of autophagy using nanoparticles: New insight into cancer therapy. Biochimica et Biophysica Acta - Molecular Basis of Disease, 1868(3). https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2021.166326

Salazar, M. M. (2009). Técnicas para la detección de apoptosis y senescencia celular in vitro y su importancia en biotecnología de la salud. In Rev. Colomb. Biotecnol: Vol. XI (Issue Diciembre).

Tao, Z., Le Blanc, J. M., Wang, C., Zhan, T., Zhuang, H., Wang, P., Yuan, Z., & Lu, B. (2016). Coadministration of trametinib and palbociclib radiosensitizes KRAS-mutant non-small cell lung cancers in vitro and in vivo. Clinical Cancer Research, 22(1), 122–133. https://doi.org/10.1158/1078-0432.CCR-15-0589

Yun, C. W., & Lee, S. H. (2018). The roles of autophagy in cancer. In International Journal of Molecular Sciences (Vol. 19, Issue 11). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/ijms19113466

Zhang, X., Chen, L. X., Ouyang, L., Cheng, Y., & Liu, B. (2012). Plant natural compounds: Targeting pathways of autophagy as anti-cancer therapeutic agents. Cell Proliferation, 45(5), 466–476. https://doi.org/10.1111/j.1365-2184.2012.00833.x

Sobre los autores:

Carlos Alberto García Torres es estudiante de la licenciatura en Biología de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Brenda Lizbeth Arroyo Reyes es maestra en Tecnologías en Materiales Avanzados por el Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Plácido Zaca Morán es doctor en ciencias en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica

Cita:
García Torres, C. A., Arroyo Reyes, B. L., & Zaca Morán, P. (2025). La ciencia que hace morir al cáncer: Estrategias desde el laboratorio. Biotecnológica Magazine, 3(3), 11-18. https://doi.org/10.5281/zenodo.15869848

Biodiesel, hacia un futuro energético más verde

Abraham Loera-Muro[1*], Goretty Caamal-Chan[1,] Ana Reyes[2].

[1]SECIHTI-CIBNOR, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, La Paz, B.C.S., México.
[2]Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, La Paz, B.C.S., México.

Tema: El ritmo de vida actual hace necesario el uso de grandes cantidades de combustibles incrementando la necesidad de mayor volumen de producción. Sin embargo, debido a los efectos del cambio climático por la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, existe una clara necesidad de pasar de los combustibles fósiles a fuentes de energía renovables o más amigables con el ambiente. Es aquí donde los biocombustibles como el biodiésel son una excelente opción para el futuro. El biodiésel es un combustible renovable que reduce las emisiones de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarburos y partículas a la atmósfera. En esta revisión, te explicaremos un poco más sobre qué es el biodiésel, cómo se produce y que ventajas tiene con respecto a los combustibles fósiles.

1. Introducción.

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo, causado en gran parte por la quema excesiva de combustibles fósiles que libera gases de efecto invernadero a la atmósfera. Hay evidencia abrumadora que confirma que la actividad humana es la causa principal del cambio climático, cuyas consecuencias afectan la producción de alimentos, los patrones migratorios y la estabilidad económica y política global. Esta situación ha generado un acuerdo global sobre la necesidad urgente de cambiar hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles. Entre las opciones disponibles, los biocombustibles destacan por su capacidad para disminuir la contaminación y ofrecer nuevas formas de obtener energía. En especial, el biodiésel ha ganado importancia como una alternativa viable al diésel tradicional, ya que proviene de materiales naturales, es menos tóxico y puede utilizarse en motores diésel sin necesidad de modificaciones (Liu et al., 2021).

En este contexto, los biocombustibles como el biodiésel ofrecen una opción interesante para cuidar el ambiente. El biodiésel es un tipo de combustible renovable que se obtiene a partir de materiales naturales como aceites vegetales, grasas animales o algas. Su gran ventaja es que, al usarse en lugar del diésel tradicional, ayuda a reducir contaminantes como el monóxido de carbono, el dióxido de carbono y otras partículas dañinas que afectan el aire que respiramos. Además, es una alternativa más sostenible porque puede producirse con recursos que se regeneran y no depende del petróleo. Su fabricación se logra mediante procesos químicos, en el que los aceites naturales se transforman en biodiésel y glicerina, utilizando alcohol y un catalizador para facilitar la reacción (Elgharbawy et al., 2021).

En los últimos años, el interés por el biodiésel ha crecido en gran medida por sus beneficios ambientales y por su potencial para impulsar economías locales mediante la producción descentralizada de energía.

doi.org/10.5281/zenodo.15869863

Esta capacidad de generar combustible a partir de recursos regionales fomenta la seguridad energética y puede impulsar sectores agrícolas e industriales, ofreciendo oportunidades sostenibles en contextos rurales y urbanos. A diferencia de los combustibles fósiles, el biodiésel es biodegradable, no tóxico y puede ser producido localmente, lo que lo convierte en una opción atractiva para reducir la dependencia de los combustibles convencionales (Fargione et al., 2008; Duran, 2020). La historia del biodiésel se remonta a finales del siglo XIX, primeros años del XX, cuando se realizó la primera experimentación con aceites vegetales en motores. El primer uso documentado de aceite vegetal como combustible para un motor diésel se produjo en la Exposición Mundial de París de 1900, cuando se utilizó aceite de maní para impulsar uno de los motores diésel expuestos (Knothe, 2010). El primer automóvil producido en serie, el Ford modelo T, funcionaba con etanol derivado del maíz. Sin embargo, a medida que la producción de automóviles se fue industrializando a principios del siglo XX, se hizo evidente que el sistema de producción de etanol ya no podía satisfacer la creciente demanda de combustible para los motores de combustión interna (Liu et al., 2021). Por consiguiente, su uso se limitó por mucho tiempo debido a los parámetros técnicos y económicos. Desde entonces, numerosos estudios han subrayado sus ventajas medioambientales, tales como, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. A pesar de sus beneficios, la producción de biodiésel enfrenta varios desafíos, entre ellos, el impacto ambiental, los costos de producción y la competencia por tierras agrícolas, ya que algunas materias primas utilizadas para obtenerlo, como el maíz o la soya, también se cultivan para alimentar a la población. Sin embargo, con el avance de tecnologías innovadoras y normativas que promueven el uso de biocombustibles, el biodiésel tiene un futuro prometedor en el ámbito energético. Estos biocombustibles se pueden clasificar en naturales, de primera generación, de segunda generación y de tercera generación (Duran, 2020).

2. Producción de biodiésel.

En un mundo que busca reducir su impacto ambiental sin renunciar a la forma de vida moderna, el biodiésel surge como una alternativa práctica e inmediata. Este biocombustible permite avanzar hacia una movilidad más limpia sin necesidad de reinventar los motores actuales. El uso de biodiésel ha ganado gran atención porque puede usarse en motores diésel sin ninguna modificación. Para su producción existen varias estrategias a partir de diversas materias primas (Duran et al., 2020).

2.1 Materias Primas para la producción de biodiésel: El biodiésel de primera generación se preparó utilizando como materia prima cultivos comestibles como maíz, soja y caña de azúcar. Estos materiales mostraron un bajo rendimiento y requieren grandes cantidades de agua y suelo, lo que implica competir con recursos esenciales para la producción de alimentos y otras necesidades humanas. El biodiésel de segunda generación se produjo principalmente utilizando como materia prima

lignocelulosa, como paja, heno, residuos de madera y otros productos no alimentarios, sin embargo, su procesamiento implica el uso de grandes cantidades de energía. Finalmente, el biodiésel de tercera generación se produce a partir de microalgas, que producen lípidos mediante la fijación de carbono durante la fotosíntesis y tienen un rendimiento de lípidos de hasta el 70%. Esta materia prima ha resultado ser muy interesante puesto que las microalgas viven en el agua, no ocupan tierras de cultivo y pueden ser cultivadas en grandes cantidades en espacios pequeños (Zhang et al., 2022).

2.2 Producción (pirólisis y transesterificación): Para obtener biodiésel se usan principalmente dos procesos: la pirólisis y la transesterificación. La pirólisis consiste en calentar aceites o grasas sin la presencia de oxígeno para romper sus moléculas grandes en otras más pequeñas que pueden transformarse en combustible. Por otro lado, la transesterificación es el método más común y práctico. En este proceso los aceites se mezclan con alcoholes como el metanol o etanol, junto con una sustancia que acelera la reacción (como hidróxido de sodio o potasio) que es un catalizador de la reacción química, para convertirlos en biodiésel y glicerina. Este método es más sencillo y rentable, y permite producir biodiésel de forma eficiente. El metanol suele ser el alcohol más utilizado por su disponibilidad y buen rendimiento (Ishak y Kamari, 2019).

3. Beneficios del Biodiésel.

El biodiésel se ha posicionado como una opción estratégica dentro del panorama de energías renovables, particularmente en el transporte, debido a su capacidad para reemplazar al diésel convencional sin alterar los motores existentes (Duran et al., 2020).

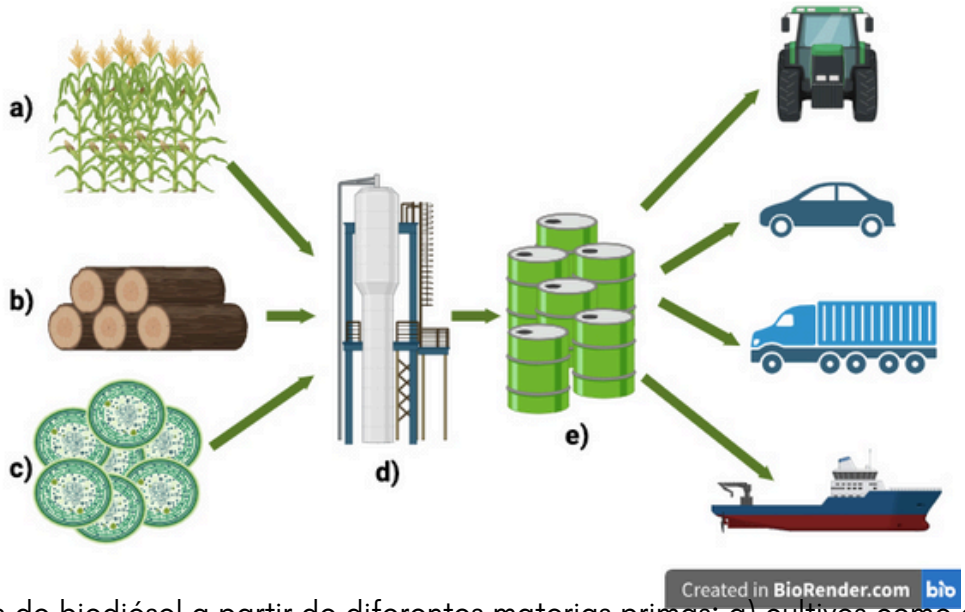


Figura 1: Producción de biodiésel a partir de diferentes materias primas: a) cultivos como el maíz, soja o caña de azúcar; b) residuos de lignocelulosa como la madera; c) microorganismos como microalgas. c) Producción industrial por el proceso de pirólisis y transesterificación. d) Distribución para su uso en vehículos con motores a diésel.

Esta compatibilidad técnica representa una ventaja significativa, ya que permite su uso inmediato sin grandes inversiones en infraestructura. Además, el biodiésel puede mezclarse en distintas proporciones con combustibles fósiles, lo que facilita su integración progresiva en los mercados actuales (Ishak y Kamari, 2019). Otro beneficio clave es su versatilidad: puede obtenerse a partir de una amplia gama de materias primas, desde aceites vegetales hasta residuos orgánicos o microalgas, lo que permite adaptar su producción a los recursos disponibles en distintas regiones (Zhang et al., 2022). Su uso contribuye, además, a reducir las emisiones de gases contaminantes, promueve el aprovechamiento de residuos y fomenta el desarrollo de economías circulares más sostenibles (Demirbas, 2009).

4. Desafíos en la Producción de Biodiésel

La producción de biodiésel es una alternativa prometedora dentro de las energías renovables. Sin embargo, la implementación y expansión de su producción se enfrenta a varios desafíos significativos. Para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y, al mismo tiempo, satisfacer la demanda mundial de combustible, los avances en la tecnología de biocombustibles como el biodiésel, deben centrarse en: 1) la optimización de la tecnología actual de producción de biocombustibles para lograr una mayor productividad y eficiencia en la conversión de biomasa; 2) la diversificación de las materias primas para garantizar la viabilidad de la producción de biocombustibles dentro de las limitaciones ecológicas y económicas xistentes (por ejemplo, la fijación de carbono a través de medios fotosintéticos y electroquímicos, así como la conversión de biorresiduos en productos de valor agregado); y 3) la expansión del espacio químico hacia moléculas de diseño que mejoren la economía y el rendimiento del combustible al tiempo que reducen las emisiones de carbono. Es necesario dedicar grandes esfuerzos a superar las barreras tecnológicas y a integrar factores sociales, económicos y ambientales para proporcionar sistemas de producción confiables, rentables y a largo plazo para la industria de los biocombustibles (Liu et al., 2021).

4.1 Suministro Insuficiente de Materias Primas: Los biocombustibles de primera generación requieren fertilización, agua y suelo, por lo que compiten directamente con la producción de alimentos. Así mismo, las estrictas regulaciones en algunos países sobre la aplicación de pesticidas y la siembra de cultivos modificados genéticamente limitan aún más su uso para la producción con este fin. Para mitigar estas deficiencias, se empezaron a utilizar los biocombustibles de segunda generación que se derivan de restos lignocelulósicos no comestibles de plantas, que consisten en hasta un 70% de azúcares polimerizados y constituyen la forma más abundante de biomasa en la Tierra, ya que se generan a partir de residuos agrícolas y forestales como astillas de madera blanca. Estos biocombustibles son atractivos porque su huella de carbono neta (carbono emitido – carbono consumido) puede ser neutra o incluso negativa. Sin embargo, el uso de lignocelulosa (por ejemplo madera) para la producción de biocombustibles requiere una extracción energética y financiera-

mente costosa de azúcares fermentables, como el pretratamiento térmico, químico y/o bioquímico (Liu et al., 2021).

4.2 Costos de Producción: Los costos de producción del biodiésel, a menudo, superan los de los combustibles fósiles, debido a factores como el tipo de materia prima empleada, el método de recolección y la eficiencia del proceso industrial. En México, por ejemplo, producir un litro de biodiésel a partir de aceites usados puede costar entre 11.10 y 13.70 pesos mexicanos, mientras que si se utilizan grasas animales como el sebo de res, el costo puede ascender hasta los 18.22 pesos por litro (REMBIO, 2016; Infobae, 2024). En contraste, los precios promedio de venta al público del diésel convencional en México alcanzaron los 24.67 pesos por litro en 2024, lo que sugiere que, a pesar de sus mayores costos de producción, el biodiésel podría representar una alternativa económicamente competitiva cuando se consideran los precios finales al consumidor. En muchos casos, el biodiésel depende de subsidios gubernamentales para ser competitivo en el mercado (Knothe, 2010).

4.3 Eficiencia de Conversión: Uno de los principales retos en la producción de biodiésel es mejorar la eficiencia con la que los aceites vegetales y las grasas animales se transforman en combustible útil. El proceso más utilizado para lograrlo se llama transesterificación, una reacción química en la que los triglicéridos (componentes de las grasas y aceites) se combinan con un alcohol, como el metanol, en presencia de una sustancia que acelera la reacción, llamada catalizador. El resultado es biodiésel (ésteres metílicos) y un subproducto llamado glicerina (Ishak y Kamari, 2019). Aunque esta técnica se emplea regularmente a nivel industrial por su simplicidad y buenos resultados, aún tiene limitaciones que afectan su eficiencia y sostenibilidad.

La presencia de humedad o ácidos grasos libres en los aceites puede interferir con la reacción, disminuyendo la cantidad de biodiésel producido o generando compuestos no deseados. Por eso, los investigadores están desarrollando nuevos tipos de catalizadores, como los heterogéneos (que no se mezclan con los reactivos) y los enzimáticos (basados en proteínas naturales), que permiten una mejor separación del producto final (Elgharbawy et al., 2021). Además, están surgiendo métodos innovadores como la transesterificación asistida por ultrasonido, microondas o incluso en condiciones supercríticas (altas presiones y temperaturas), que aceleran la reacción, aumentan el rendimiento y reducen el consumo de energía (Zhang et al., 2022).

Otro aspecto importante es el uso de materias primas alternativas, como aceites de cocina usados o grasas animales de baja calidad. Aunque requieren procesos de limpieza o pretratamiento, estas fuentes reducen costos y aprovechan residuos que, de otro modo, se desperdiciarían. Por eso, cuando hablamos de eficiencia de conversión además de referirnos a la cantidad de biodiésel que se obtiene, también nos referimos a qué tan viable y sostenible es el proceso en términos económicos, ambientales y sociales (Demirbas, 2009; Liu et al., 2021).

4.4 Impacto Ambiental: Aunque se considera que el biodiésel es menos contaminante que los combustibles fósiles, su producción puede llevar a efectos adversos sobre el medio ambiente. El uso de productos químicos en el cultivo de materias primas puede resultar en la contaminación del suelo y del agua. Además, el cambio de uso de la tierra para la producción de biodiésel puede liberar carbono y otros gases, lo que reduce sus beneficios ambientales (Knothe, 2010). Ante estas limitaciones, los investigadores han puesto su atención en fuentes alternativas como las microalgas, que no requieren suelos agrícolas ni grandes extensiones de tierra fértil. Su uso representa una oportunidad para producir biodiésel de forma más sostenible y con un menor impacto ambiental.

5. Producción de biodiésel a partir de microalgas:

El biodiésel derivado de microalgas es una de las alternativas más prometedoras a los combustibles fósiles ¿la razón?, estas diminutas plantas acuáticas tienen un alto contenido de lípidos, crecen rápidamente y pueden desarrollarse en entornos no convencionales, lo que las convierte en una fuente sostenible y eficiente de energía renovable. A diferencia de cultivos tradicionales como la caña de azúcar, el maíz o la soja, las microalgas pueden generar una cantidad significativamente mayor de biomasa por unidad de superficie. Además, su producción no compite con la agricultura destinada a la alimentación, lo que refuerza su papel como una solución viable para la transición energética (Zhang et al., 2022).

Entre las especies más estudiadas para la producción de biodiésel destacan Chlorella, Nannochloropsis y Botryococcus braunii, conocidas por su gran capacidad de acumulación de lípidos (Elgharbawy et al., 2021). Lo más interesante es que, su cultivo no requiere tierras agrícolas fértiles: pueden crecer en aguas residuales, salinas o en sistemas cerrados como fotobiorreactores. Esto optimiza su producción, y al mismo tiempo ayuda a reducir el impacto ambiental y el uso excesivo de recursos naturales (Liu et al., 2021).

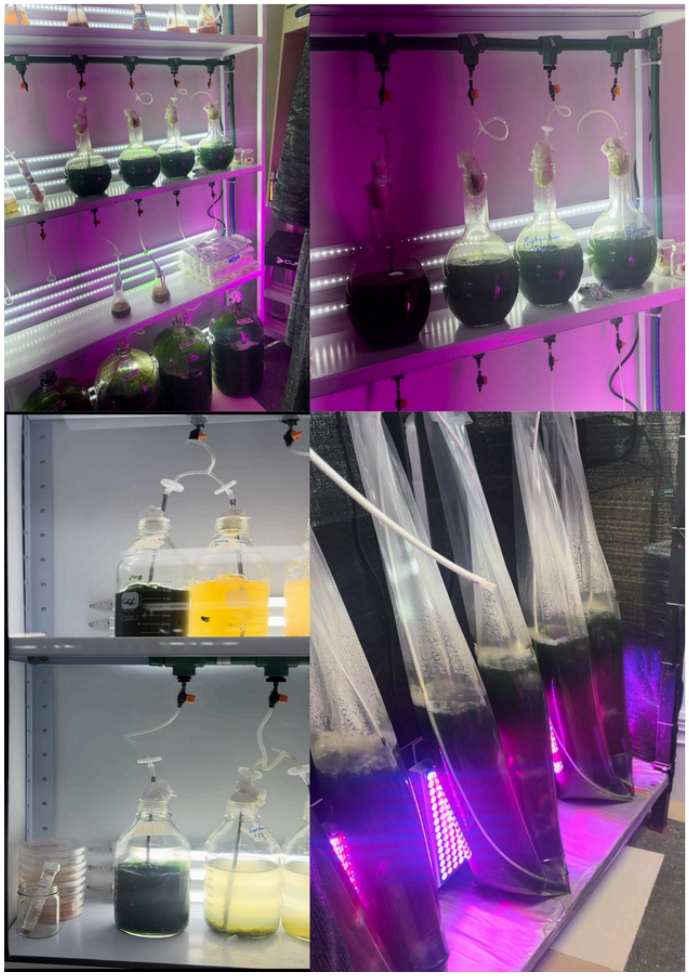


Figura 2: Producción de biodiésel a partir de microalgas a través del uso de bioreactores.

doi.org/10.5281/zenodo.15869863

El proceso de producción de biodiésel a partir de microalgas involucra varias etapas clave: La cosecha de la biomasa en donde se recolectan las algas cultivadas, la extracción de lípidos que significa retirar los aceites de las microalgas mediante métodos mecánicos o químicos, y finalmente la conversión de los aceites en biodiésel con un proceso llamado transesterificación. En este proceso, los lípidos se transforman en compuestos llamados ésteres metílicos de ácidos grasos y son el principal componente del biodiésel. En los últimos años, han surgido enfoques innovadores para hacer este proceso más eficiente y ecológico. Métodos como la extracción asistida por microondas o el uso de enzimas están en desarrollo para reducir costos y minimizar el impacto ambiental (Ishak y Kamari, 2019). La cantidad de lípidos que acumulan las microalgas depende de factores como la luz, la temperatura y los nutrientes disponibles. Un método ampliamente estudiado para aumentar la producción de grasas es la limitación de nitrógeno, que aunque favorece la acumulación de lípidos, puede disminuir el crecimiento de las microalgas (Demirbas, 2009).

Por otro lado, el uso de aguas residuales y sistemas de cultivo en circuito cerrado ofrece una alternativa sostenible, ya que permite reciclar nutrientes y reducir costos operativos, además de minimizar el impacto ambiental (Liu et al., 2021). Sin embargo, a pesar de su enorme potencial, la producción de biodiésel a partir de microalgas todavía enfrenta desafíos importantes, principalmente los altos costos operativos y la optimización de la cosecha y extracción de lípidos.

Para superar estas barreras, se están desarrollando tecnologías emergentes como los fotobiorreactores de circuito cerrado y los modelos de biorefinería integrada, que buscan mejorar la eficiencia y reducir costos (Fargione et al., 2008). Además, el aprovechamiento de residuos industriales como fuente de nutrientes es una estrategia interesante para hacer esta tecnología aún más viable y sostenible (Duran, 2020).

El biodiésel derivado de microalgas es una alternativa ecológica e innovadora a los combustibles fósiles. Sin embargo, para que pueda implementarse a gran escala, es necesario continuar optimizando las tecnologías de cultivo, extracción y conversión. Con avances en ingeniería biológica, reducción progresiva de costos y apoyo en políticas energéticas sostenibles, este biocombustible tiene el potencial de convertirse en el protagonista de la transición hacia un modelo energético más limpio y renovable. A medida que la investigación y la inversión en biotecnología avanzan, las microalgas podrían pasar de ser una promesa a una realidad tangible en la lucha contra el cambio climático y la búsqueda de independencia de los combustibles fósiles (Knothe, 2010).

6. Conclusiones y perspectivas futuras para el biodiésel y los biocombustibles.

Aunque el biodiésel posee un gran potencial como fuente de energía renovable, su producción enfrenta varios desafíos que requieren atención. Así mismo, es necesario dedicar esfuerzos importantes no solo a superar las barreras tecnológicas, sino también a integrar los factores sociales, económicos y

ambientales para proporcionar sistemas de producción a largo plazo, rentables y confiables para la industria de los biocombustibles. Abordar estos problemas no solo mejorará la viabilidad económica del biodiésel, sino que también asegurará que contribuya de manera efectiva al desarrollo sostenible y a mitigar los efectos del cambio climático al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Glosario

Combustible: son compuestos de los que se obtiene energía que se usa posteriormente para proporcionar servicios energéticos como calefacción, transporte o generación de energía eléctrica.

Combustibles fósiles: son combustibles fabricados por procesos geológicos que actúan sobre antiguos organismos muertos. Estos organismos muertos fueron enterrados hace cientos de millones de años. Los combustibles fósiles no se consideran una fuente de energía renovable porque no pueden reproducirse al ritmo que se consumen.

Biocombustibles: son combustibles derivados de fuentes orgánicas como la biomasa y residuos orgánicos. Los biocombustibles son fuentes de energía renovables y alternativas a los combustibles fósiles.

Biodiésel: biocombustible que se obtiene a partir de materiales naturales como aceites vegetales, grasas animales o algas.

Catalizador: Sustancia que acelera una reacción química sin gastarse en el proceso.

Gases de efecto invernadero: gases presentes en la atmósfera que atrapan el calor del sol, impidiendo que se libere al espacio, lo que provoca el calentamiento del planeta. Algunos de los más conocidos son el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). Aunque son necesarios para mantener una temperatura adecuada en la Tierra, su exceso está causando el cambio climático.

Azúcares polimerizados: moléculas grandes formadas por la unión repetida de azúcares simples. Son comunes en las plantas, donde forman estructuras como la celulosa o el almidón, y pueden convertirse en biocombustibles tras ser descompuestas en azúcares más pequeños.

Referencias:

Demirbas, A. (2009). Biofuels: Securing the planet's future energy needs. Energy Conversion and Management, 50(9), 2239-2249. doi: 10.1016/j.enconman.2009.05.010

Duran, S.K. (2020). A review on oil extraction and biofuels production from various materials. Mater. Today Proc., 26, 261-265. doi: 10.1016/J.MATPR.2019.11.223

Elgharbawy, A.S., Wagih, S.A., Olfat, O.M. y Mosaad, K.A. (2021). A REVIEW ON BIODIESEL FEEDSTOCKS AND PRODUCTION TECHNOLOGIES. Journal of the Chilean Chemical Society, 66(1), 5098-5109. doi: 10.4067/S0717-97072021000105098

Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S. y Hawthorne P. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. Science, 319(5867), 1235-8. doi: 10.1126/science.1152747.

Infobae. (2024). Biodiésel: cuánto cuesta y dónde conseguir esta alternativa a la gasolina que contamina menos. Infobae México.

Ishak, S. y Kamari A. (2019). A review of optimum conditions of transesterification process for biodiesel production from various feedstocks. Int. J. Environ. Sci. Technol. 16, 2481-2502. doi: 10.1007/s13762-019-02279-6

Knothe, G. (2010). Biodiesel and renewable diesel: A comparison. Progress in Energy and Combustion Science, 36, 364–373. doi: 10.1016/j.pecs.2009.11.004

Liu, Y., Cruz-Morales, P., Zargar, A., Belcher, M.S., Pang, B., Englund, E., Dan, Q., Yin, K. y Keasling J.D. (2021). Biofuels for a sustainable future. Cell, 184(6), 1636-1647. doi: 10.1016/j.cell.2021.01.052.

REMBIO. (2016). Estudio del estado del arte y determinación del potencial de producción de biodiesel a partir de aceites residuales de cocina en México. Secretaría de Energía - Fideicomiso de Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE). Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/275444/

Zhang, S., Zhang, L., Xu, G., Li, F. y Li X. (2022). A review on biodiésel production from microalgae: Influencing parameters and recent advanced technologies. Front. Microbiol., 13, 970028. doi: 10.3389/fmicb.2022.970028

Cita:
Loera Muro, A., Caamal-Chan, G., & Reyes, A. (2025). Biodiesel, hacia un futuro energético más verde. Biotecnológica Magazine, 3(3), 19-27. https://doi.org/10.5281/zenodo.15869863

Sobre los autores:

Dr. Abraham Loera-Muro.
Licenciado en Biología por la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Diploma de Estudios Avanzados en Biología Molecular y Bioquímica por la Universidad Autónoma de Madrid, España. Doctorado en Ciencias Biológicas por la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Estancia de Investigación en la Universidad de Montreal, Canadá. Forma parte del SIN nivel I. Cuenta con 33 artículos publicados en revistas JCR o SCOPUS en las áreas de biotecnología vegetal y microbiología, una patente y dos capítulo de libro. Desde el 2015 y a la fecha, Investigador por México, comisionado al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), en La Paz, BCS.

Dra. María Goretty Caamal-Chan.
Ingeniero Bioquímico por el Instituto Tecnológico de Mérida. Doctorado en Ciencias y Biotecnología de plantas por el Centro de Investigación Científica de Yucatán. Estancia de investigación en la Universidad de Murcia, España. Estancia pos-doctoral en la Universidad de Sherbrooke, Canadá. Desde el 2015 Investigadora por México, comisionado al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), en La Paz, BCS. Forma parte del SNII nivel I.

Dra. Ana Gisela Reyes Alvarado.
La Dra. Ana Gisela Reyes Alvarado es biotecnóloga con más de 15 años de experiencia en el desarrollo de procesos sostenibles para la producción de biomoléculas. Su trayectoria abarca desde la investigación en proteínas microbianas hasta la valorización de residuos vegetales como fuentes de biocombustibles. Ha liderado proyectos que promueven la economía circular, integrando biotecnología ambiental con impacto social. Su trabajo vincula ciencia, sostenibilidad e innovación tecnológica para enfrentar los retos ambientales del siglo XXI.

¿Puede ayudarnos el café a prevenir el cáncer? Lo que dice la ciencia

Norma Patricia Silva-Beltrán[1,2*], Nohemi Gámez-Meza[3], Luis Angel Medina- Juárez[3].

1. Universidad de Sonora. Blvd. Bordo Nuevo s/n, antiguo Ejido Providencia, Cd. Obregón, Sonora, México. CP 85010
2. The University of Arizona. Water & Energy Sustainable Technology (WEST) Center 2959 W. Calle Agua Nueva. Tucson, AZ 85745.
3. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora,Hermosillo, C.P. 83000, Sonora, México

Tema: El café es una de las bebidas más consumidas en el mundo y, además de ser parte fundamental de la vida cotidiana de millones de personas, está atrayendo cada vez más atención por sus posibles beneficios en la salud. En particular, investigaciones recientes han sugerido que su consumo moderado podría tener efectos protectores frente a ciertos tipos de cáncer. Este artículo no busca promover el consumo de café, sino acercar al lector, de manera accesible, a lo que dice la ciencia sobre el efecto del café en el cáncer, incluyendo tanto los hallazgos positivos como las limitaciones existentes.

Mientras algunos estudios señalan beneficios potenciales, otros advierten sobre posibles riesgos en contextos específicos. Por ello, es importante que el público tenga acceso a la información científica disponible hasta ahora.

En este texto se abordan las principales evidencias sobre la relación entre el café y la prevención del cáncer, así como los mecanismos biológicos que podrían estar implicados y factores relevantes como la especie, el método de preparación y el tipo de procesamiento, que influyen en sus propiedades.

1. El café como fuente de compuestos bioactivos.

Es importante considerar las diferentes especies y formas en que se comercializa el café. Las dos especies más cultivadas a nivel mundial son *Coffea arabica* y *Coffea canephora* (también conocida como Robusta). El *Coffea arabica* representa aproximadamente el 60% de la producción global y es apreciado por su sabor suave y bajo contenido de cafeína, mientras que el Robusta tiene un sabor más fuerte y mayor concentración de cafeína.

Estas diferencias no solo afectan su sabor, sino también su perfil de compuestos bioactivos, lo que podría influir en sus posibles beneficios para la salud.

El café no solo contiene cafeína, sino también una gran cantidad de compuestos con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. Entre ellos se encuentran los ácidos clorogénicos, el cafestol, el kahweol y la trigonelina. Estos compuestos pueden ayudar a reducir el daño oxidativo en las células, regular la respuesta inmune y modular procesos celulares relacionados con el crecimiento y la muerte celular (Fig. 1) (Castro-Díaz et al., 2025).

doi.org/10.5281/zenodo.15869879

Es importante destacar que el perfil fitoquímico del café varía no sólo en función de la especie, sino también dependiendo de las condiciones climáticas, el grado de madurez del fruto, los métodos de preparación y las condiciones de procesamiento. Por lo tanto, la composición fitoquímica está influenciada tanto por factores bióticos como abióticos, lo que resulta en una diversidad de efectos biológicos asociados a estos compuestos.

Entre los tipos de cáncer más estudiados con relación al café se encuentran el hepático, endometrial, de piel, colorrectal, de próstata y los cánceres de cabeza y cuello. Por ejemplo, una revisión recientemente publicada en GeroScience (Kunutsor et al., 2024a) encontró que beber tres o más tazas de café al día se asocia con una reducción significativa en la recurrencia del cáncer colorrectal.



Figura 1. Principales compuestos bioactivos presentes en el café y sus propiedades biológicas.

2. Evidencia epidemiológica: ¿qué nos dicen los estudios sobre el consumo de café y el cáncer?

En los últimos años, cada vez más estudios epidemiológicos han explorado la relación entre el consumo habitual de café y el riesgo de desarrollar diversos tipos de cáncer. En general, los resultados apuntan a una asociación positiva entre el consumo moderado de esta bebida y una reducción del riesgo en ciertos tipos de cáncer, aunque también hay matices que deben ser considerados (Kunutsor et al., 2024a).

De forma similar, una revisión de alcance amplio (umbrella review) identificó evidencia sólida que respalda un efecto protector del café en casos de cáncer hepático y endometrial. Otros estudios también destacan que el consumo habitual de café y té podría disminuir el riesgo de cánceres de cabeza y cuello (Nguyen et al., 2024).

Particularmente destacable es un hallazgo reportado por Oyelere (2024), donde se observó que pacientes con cáncer colorrectal que consumían más de cuatro tazas de café al

día tenían un 32% menos riesgo de recurrencia tumoral.

Estos datos sugieren que ciertos compuestos presentes en el café podrían influir en el microambiente tumoral, reduciendo la inflamación y favoreciendo respuestas inmunológicas más eficaces contra las células cancerosas.

Un metaanálisis también identificó una asociación significativa entre un mayor consumo de café y un menor riesgo de cáncer de próstata, incluidas las formas avanzadas y mortales de la enfermedad (Lu et al., 2022). Los mecanismos propuestos incluyen efectos antioxidantes, antiinflamatorios y moduladores hormonales. Asimismo, se ha reportado que el café podría ofrecer una protección moderada frente al melanoma y otros tipos de cáncer de piel, sobre todo en personas no fumadoras (Zhao et al., 2020).

Por otro lado, algunos estudios también han abordado la posible relación entre el consumo de café y el riesgo de cáncer de pulmón. Aunque se trata de uno de los tipos de cáncer ha sido ampliamente investigado en relación con el café, la mayoría de los estudios se centran en evaluar riesgos potenciales más que beneficios preventivos. Otro metaanálisis publicado en *Scientific Reports* (Kunutsor *et al.*, 2024b) analizó datos de 14 cohortes, sugirió un posible aumento del riesgo de cáncer de pulmón en mujeres. Sin embargo, los autores aclaran que estos hallazgos podrían estar influenciados por el tabaquismo y otros factores de confusión. Por ello, la evidencia no es concluyente de que el café incrementa directamente el riesgo de cáncer de pulmón. Estos hallazgos se sintetizan en la figura 2, la cual presenta un panorama general de la relación entre el consumo de café y diferentes tipos de cáncer.



Figura 2. Evidencia epidemiológica del consumo de café y su asociación con distintos tipos de cáncer.

No obstante, estas asociaciones deben ser interpretadas con precaución. La mayoría de los estudios son observacionales, lo que implica que no pueden establecer una relación de causa-efecto. Además, la heterogeneidad en los métodos de preparación del café, la cantidad consumida, las características genéticas del individuo y otros factores del estilo de vida pueden influir en los resultados.

A pesar de las limitaciones, el conjunto de evidencia disponible es alentador y plantea la necesidad de seguir investigando con estudios más controlados y diseños experimentales que permitan comprender mejor el papel potencial del café como agente preventivo en la oncología.

3. ¿Cómo actúa el café a nivel celular?

Además de las observaciones epidemiológicas, se ha avanzado en la comprensión de los posibles mecanismos biológicos mediante los cuales el café podría ejercer efectos protectores. Se ha demostrado que la cafeína puede modular vías de señalización celular involucradas en la proliferación tumoral, como PI3K/AKT/mTOR y MAPK. Estos caminos están relacionados con el crecimiento y supervivencia celular, y su regulación podría ser clave en la prevención de la formación y progresión de tumores (Enoma et al., 2019; Manica et al., 2024).

Asimismo, el café parece tener un impacto sobre el sistema inmunológico. Por ejemplo, se ha observado que puede activar células inmunes como los linfocitos T y las células NK (natural killer), que son fundamentales en la defensa del organismo frente a células anormales. También hay evidencia de que la cafeína y otros compuestos del café influyen en la composición de la microbiota intestinal, lo cual es relevante dado el papel que esta juega en la inflamación sistémica y la modulación de la respuesta inmune (Enoma et al., 2019). En modelos celulares y animales, la cafeína ha demostrado potenciar los efectos de fármacos quimioterapéuticos como el cisplatino, induciendo mayor apoptosis (muerte celular programada) en células cancerosas.

4. Lo que aún no sabemos (y lo que debemos tener en cuenta).

Aunque las evidencias son prometedoras, muchos estudios muestran resultados inconsistentes debido a diferencias metodológicas, tipos de café (filtrado, instantáneo, descafeinado), cantidades consumidas y factores de estilo de vida como el tabaquismo. También influye la genética de cada individuo, ya que algunas personas metabolizan la cafeína de forma más lenta, lo que podría alterar sus efectos. Asimismo, el momento del día, el estado de salud general y la interacción con medicamentos o tratamientos oncológicos son variables poco exploradas.

Por otro lado, muchos estudios disponibles son observacionales, lo que implica que pueden mostrar asociaciones, pero no necesariamente relaciones causa-efecto. Es necesario seguir impulsando ensayos clínicos y estudios controlados que permitan confirmar con mayor certeza el papel protector del café frente al cáncer.

Además, hay que tener en cuenta que, si bien algunos compuestos del café han mostrado propiedades anticancerígenas en modelos celulares o animales, estos resultados no siempre se traducen directamente al contexto humano. Aún queda por esclarecer cuáles son los mecanismos exactos involucrados, qué dosis son efectivas y seguras, y si los efectos protectores aplican por igual a todas las personas o solo a ciertos subgrupos.

Por todo ello, el café no debe considerarse un sustituto de medidas preventivas o de mejoría para la salud, como algunas ya comprobadas, como dieta balanceada, actividad física, evitar el consumo de tabaco y alcohol, y mantener revisiones médicas periódicas.

Conclusión. Los estudios recientes sugieren que el café, consumido con moderación, podría desempeñar un papel en la prevención de ciertos tipos de cáncer. Sin embargo, queda mucho por investigar, pero su potencial como

aliado en la salud pública lo que lo convierte en un tema fascinante para seguir explorando.

No obstante, es importante reconocer que no todos los cafés son iguales. La especie (*Coffea arabica* o *Coffea canephora*), el tipo de cultivo, el grado de tueste, el método de preparación y los procesos de industrialización pueden modificar el perfil de compuestos bioactivos presentes en la bebida. Esto implica que el contenido real de cafeína, ácidos clorogénicos u otros antioxidantes puede variar significativamente de un café a otro, y por lo tanto también sus posibles efectos en la salud.

En este sentido, la mercadotecnia juega un papel importante al promover el café como un producto saludable. Sin embargo, es crucial que estas campañas se basen en evidencia científica y no en generalizaciones. El consumidor debe estar informado y saber que, si bien el café puede tener beneficios, estos dependen de múltiples factores y no deben utilizarse como sustituto de hábitos saludables ya establecidos.

Promover una cultura de concientización sobre el consumo informado del café y su integración dentro de un estilo de vida saludable es clave. Las decisiones responsables sobre nuestra alimentación y hábitos diarios pueden marcar la diferencia en la prevención del cáncer. Por ello, conocer y difundir el valor preventivo que podrían tener productos cotidianos como el café siempre con base científica puede ayudar a la población a tomar decisiones más saludables desde lo cotidiano.

Referencias

Castro-Díaz R., Silva-Beltrán N.P., Gámez-Meza N., Calderón K. (2025). The Antimicrobial Effects of Coffee and By-Products and Their Potential Applications in Healthcare and Agricultural Sectors. *Microorganisms*, 13(2). https://doi.org/10.3390/microorganisms13020215.

Enoma D.O., Dokunmu T.M., Obi, P.O. (2019). The Anticancer Activity of Caffeine – A Review. *Archives of Clinical and Biomedical Research*, 3(5), 326–342.

Kunutsor S. K., Lehoczki A., Laukkanen, J.A. (2024a). Coffee consumption, cancer, and healthy aging: epidemiological evidence and underlying mechanisms. *GeroScience*, https://doi.org/10.1007/s11357-024-01332-8.

Kunutsor S.K., Lehoczki A., Laukkanen, J.A. (2024b). Coffee consumption and lung cancer risk: A dose–response meta-analysis. *Scientific Reports*, https://www.nature.com/articles/s41598-024-62619-6.

Manica da Silva, G.B., de Lima J. *et al.* 2024. Caffeine reduces viability, induces apoptosis, inhibits migration and modulates the CD39/CD73 axis in metastatic cutaneous melanoma cells. *Purinergic Signalling* **20**, 385–397. https://doi.org/10.1007/s11302-023-09967-6.

Lu Y., Zhai L., Zeng J. Peng Q., Wang J., Deng Y., Mo M. (2021). Coffee consumption and prostate cancer risk: An updated meta-analysis. *BMJ Open*, 11(1), e038902. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-038902.

doi.org/10.5281/zenodo.15869879

Nguyen T., Koric A., Chang C.E., Barul Ch., Radoi L. et al. (2024). Coffee and tea consumption and head and neck cancer risk. *Cancer*, https://acsjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cncr.35620.

Oyelere A.M., Kok D.E., Bos D., Gunter M.J., Ferrari P., Keski-Rahkonen P., de Wilt J. H. W., van Halteren, H. K., Kouwenhoven, E. A., van Duijnhoven, F. J. B., & Kampman, E. (2024). Coffee consumption is associated with a reduced risk of colorectal cancer recurrence and all-cause mortality. *International Journal of Cancer*, 154(12), 2054–2063. https://doi.org/10.1002/ijc.34879.

Zhao Y., Wang J., Zhang, X. (2020). Coffee drinking and cancer risk: an umbrella review of meta-analyses of observational studies. *BMC Cancer*, 20, 101. https://doi.org/10.1186/s12885-020-6561-9.

Cita:
Silva-Beltrán, N. P., Gamez-Meza, N., & Medina-Juárez, L. Á. (2025). ¿Puede ayudarnos el café a prevenir el cáncer? Lo que dice la ciencia. Biotecnológica Magazine, 3(3), 28-33. https://doi.org/10.5281/zenodo.15869879

Sobre los autores:



Dra. Norma Patricia Silva Beltrán. Profesora del Departamento de Ciencias de la Salud de la Universidad Sonora e investigador asociado en el departamento de ciencias ambientales de la Universidad de Arizona, EE.UU. Miembro vigente del Sistema Nacional de Investigadores, SNI 1.



Dra. Nohemi Gámez Meza. Profesora del Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad Sonora. Miembro vigente del Sistema Nacional de Investigadores, SNI 3. Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias.



Dr. Luis Angel Medina Juárez. Profesor del Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad Sonora. Miembro vigente del Sistema Nacional de Investigadores, SNI 2. Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias.

Biotecnología Azul: El poder oculto de la mucosidad de los pulpos

Macario Savin Amador [1,2*], Liliana Hernández Olalde [2], Oscar Trujillo-Millán [2]
1.Universidad Tecnológica de La Paz, SN, La Paz, Baja California Sur.
2. Universidad Autónoma de Baja California Sur, La Paz B.C.S.
*Correspondencia: msavin@utlp.edu.mx

¿Quiénes son los pulpos?

Si conoces a los pulpos, ya sea por verlos en algún documental, película o en un acuario, tal vez piensas en cómo cambian de color, cómo se escabullen por grietas estrechas o de dónde proviene la tinta que liberan para escapar de sus depredadores. Los pulpos pertenecen al grupo de los cefalópodos, moluscos marinos de cuerpo blando que se caracterizan por su cabeza grande, así como por poseer ocho brazos, capacidad de camuflaje, ojos similares a los de los vertebrados, tres corazones y un sistema nervioso altamente desarrollado (Jereb y Roper, 2005). Los pulpos han asombrado a los científicos por su notable inteligencia, pero estos increíbles animales esconden otro secreto aún más asombroso: la mucosidad de su piel. La mucosidad, es una sustancia viscosa producida naturalmente por la piel de los pulpos, que no solo los protege de su entorno, sino que contiene moléculas bioactivas (sustancias con actividad biológica que afectan directamente a un organismo vivo de manera positiva o negativa según la sustancia, la dosis y su biodisponibilidad (Schachter y Williams, 1982; Allam y Espinosa, 2015)) con un enorme potencial para su uso en la biotecnología, la medicina y la sostenibilidad de su cultivo (Pérez-Polo et al., 2023).

¿Por qué son resbaladizos los pulpos?

La característica resbaladiza de los pulpos se debe a una capa de mucosidad que recubre su piel, la cual es producida por dos tipos de células especializadas llamadas “células caliciformes” y mucocitos (Schmidtberg., 1999; Allam y Espinosa, 2015; Parra et al., 2015; Anadón, 2019). Cabe destacar que la mucosa es el tejido epitelial que recubre la superficie interna de órganos o estructuras, incluyendo la piel de algunos animales marinos como los pulpos. Esta mucosa contiene células especializadas encargadas de secretar la mucosidad, una sustancia viscosa que cumple funciones protectoras, fisiológicas e inmunológicas. Este moco está formado por agua, electrolitos, células epiteliales y sanguíneas, así como por proteínas (mucinas) y otras moléculas bioactivas; facilita el locomoción o movimiento y el deslizamiento, permitiéndoles moverse con agilidad sobre superficies rugosas o atravesar grietas estrechas sin lastimarse. Al reducir la fricción, el moco actúa como una especie de lubricante natural que protege su piel y mejora su desplazamiento por el fondo marino (Guardiola et al., 2015). Así mismo, el moco es una de las primeras líneas de interacción de los pulpos con el entorno, y cumple con otras funciones esenciales para su supervivencia.

doi.org/10.5281/zenodo.15869891

¿Qué otras funciones tiene la mucosidad?

De acuerdo con Allam y Espinosa, (2015); Guardiola et al., (2015) y Fernández-Alacid et al., (2018) la mucosidad de la piel de los pulpos cumple con múltiples funciones fundamentales como (Fig.1):

- Protección contra temperaturas extremas.
- Locomoción y deslizamiento.
- Regulación de la salinidad corporal (osmorregulación).
- Intercambio gaseoso (respiración).
- Defensa contra agentes químicos, físicos y biológicos.

Las cuales se detallan a continuación:
La mucosidad funciona como **protección frente a temperaturas extremas**, al actuar como un aislante natural que ayuda a estabilizar la temperatura corporal de los pulpos cuando hay cambios bruscos en el ambiente. Esta capa de moco evita que el frío o el calor afecten directamente a los tejidos, algo especialmente importante para especies como el pulpo *Octopus vulgaris*, que habita zonas costeras con variaciones térmicas significativas (Allam y Espinosa, 2015).

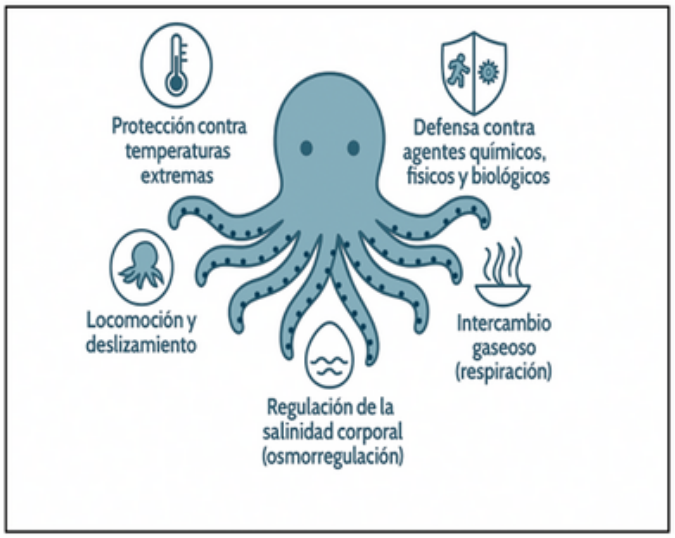


Figura 1. Funciones principales de la mucosidad de la piel en los pulpos. Elaboración propia con Open IA.

Otra función esencial es la osmorregulación, es decir, el control del equilibrio de agua y sales dentro del cuerpo. La mucosidad de la piel contribuye a que los pulpos mantengan su estabilidad hídrica e iónica interna incluso cuando cambian las condiciones de salinidad en el entorno. Esta regulación es vital para que sus células no se dañen por exceso o falta de agua (Allam y Espinosa, 2015). Asimismo, la mucosidad participa en el intercambio gaseoso, especialmente en regiones de la piel del pulpo que están muy vascularizadas (ricas en vasos sanguíneos que transportan oxígeno y nutrientes). Aunque la respiración se realiza principalmente en las branquias, el moco puede facilitar el paso de oxígeno y dióxido de carbono a través de la superficie de la piel, complementando así la función respiratoria (Fernández-Alacid et al., 2018).

La mucosidad: una barrera activa de protección
Una de sus funciones más importantes de la mucosidad es la defensa contra agentes químicos, físicos y biológicos (Savin-Amador et al., 2024). La mucosidad de la piel de los pulpos contiene una mezcla compleja de sustancias proteicas que el cuerpo usa para crecer, moverse, defenderse y mantenerse sano como: las mucinas (proteínas especiales que le dan al moco su textura pegajosa y resbaladiza), péptidos antimicrobianos (pequeñas proteínas que atacan y eliminan microbios dañinos) y enzimas (proteínas especiales que aceleran las reacciones químicas dentro de las células). Estos compuestos bioactivos protegen a los pulpos de bacterias, virus, hongos y toxinas del medio ambiente. El moco actúa como una primera línea inmunológica (sistema de defensa del cuerpo) que no solo bloquea el ingreso de

patógenos (microorganismos que pueden causar enfermedades), sino que también neutraliza estas amenazas. Esta función ha sido respaldada por estudios recientes en moluscos cefalópodos, que han identificado componentes del sistema inmune innato (la primera línea de defensa que tienen todos los seres vivos contra las infecciones) en la mucosidad. Estos componentes incluyen histonas (proteínas que ayudan a empaquetar y organizar el ácido desoxirribonucleico o ADN dentro de las células), lectinas (proteínas que ayudan al cuerpo a reconocer lo que es propio y lo que es extraño, especialmente microbios), defensinas (pequeños fragmentos de proteínas que actúan como armas naturales del cuerpo para destruir microbios) y proteínas del complemento (un conjunto de proteínas que forman parte del sistema inmune y que ayudan a eliminar microbios al marcar a los patógenos para su destrucción o al perforar sus membranas celulares) (Pérez-Polo et al., 2023; Roura et al., 2024).

Además de sus funciones físicas, la mucosidad actúa como un reservorio de moléculas del sistema inmunitario innato (Allam y Espinosa, 2015; Guardiola et al., 2015; Fernández-Alacid et al., 2018; Parra et al., 2025). Diversos estudios han demostrado que contiene compuestos con propiedades antimicrobianas, capaces de atacar o inhibir microorganismos, y antioxidantes, que protegen las células del daño causado por radicales libres generados tanto por procesos naturales como por factores ambientales (Benoist et al., 2020; Suárez et al., 2021; Savin-Amador et al., 2024). Aunque el sistema inmunológico asociado a la mucosidad en cefalópodos aún está en fase de exploración, en Octopus vulgaris se han identificado proteínas clave como histonas con actividad antimicrobiana, proteínas tipo lectina implicadas en el reconocimiento de patógenos, y proteínas similares alfactor H, que participan en la regulación del sistema del complemento, evitando que el sistema inmunológico ataque por error las propias células del organismo (Pérez-Polo et al., 2023; Roura et al., 2024).

¿Qué puede revelar la mucosidad?

El análisis de la mucosidad permite conocer cómo factores como la estacionalidad, la ubicación geográfica, el estado de madurez o el estrés influyen en la cantidad y calidad de las proteínas y compuestos bioactivos presentes (Allam y Espinosa, 2015).

Para entender mejor cómo varía la mucosidad del pulpo según distintos factores, los científicos utilizan el análisis del proteoma, es decir, el estudio del conjunto completo de proteínas que produce un organismo, tejido o célula en un momento determinado. Para ello, se extrae la mucosidad del pulpo y se someten a técnicas como la electroforesis en gel, que permite separar las proteínas según su tamaño, y la espectrometría de masas, una herramienta que identifica y mide con gran precisión las proteínas presentes. Estas tecnologías ayudan a detectar qué proteínas están activas, en qué cantidad, y si han cambiado por efecto del ambiente, el estrés o una enfermedad (Addis et al., 2013) (Fig. 2). El análisis proteómico de la mucosidad de la piel de los pulpos permite:

- Evaluar la respuesta inmunitaria.
- Identificar biomarcadores, es decir, señales que indican si el animal está sano, estresado o enfermo.

doi.org/10.5281/zenodo.15869891

- Monitorear el impacto de las condiciones de cultivo.
- Detectar cambios tempranos asociados al estrés o a enfermedades.
- Descubrir péptidos y proteínas con propiedades bioactivas que podrían tener aplicaciones en medicina, farmacología o nutrición.

Además, identificar proteínas específicas podría ayudar a distinguir etapas de senescencia (envejecimiento), un momento crítico en la vida de los pulpos (Holst et al., 2022; Roura et al., 2024).

En la Figura 2A se muestra cómo uno de los usos biotecnológicos más importantes del análisis del proteoma es evaluar la respuesta inmunitaria del pulpo. A través de esta técnica, es posible identificar proteínas clave del sistema inmune innato presentes en la mucosidad, como histonas, lectinas, defensinas y proteínas del complemento, que actúan frente a bacterias, virus u hongos. Su detección permite conocer el estado inmunológico del animal de forma no invasiva. Además, el estudio del proteoma permite identificar biomarcadores (Fig. 2B), es decir, señales naturales que revelan si el pulpo está sano, estresado o enfermo. Estas pistas moleculares pueden ayudar a tomar decisiones rápidas en el manejo de los animales en cautiverio, mejorando su cuidado y prevención de enfermedades.

Otro aspecto clave es que este tipo de análisis permite monitorear el impacto de las condiciones de cultivo (Fig. 2C). Los pulpos que viven en ambientes naturales, en acuarios o en sistemas de cultivo muestran diferencias en la composición de su mucosidad (Pérez-Polo et al., 2023). Al comparar estas diferencias, se puede saber cómo afectan factores como el encierro, la alimentación, la calidad del agua o el manejo general. También se ha visto que la mucosidad puede ayudar a detectar cambios tempranos relacionados con el estrés o las enfermedades (Fig. 2D). Algunos compuestos proteicos se modifican desde las primeras etapas de deterioro, incluso antes de que el animal muestre síntomas visibles (Pérez-Polo et al., 2023). Esta capacidad de alerta temprana es muy valiosa tanto para la investigación como para la conservación y producción sostenible. Además, el análisis del proteoma permite identificar péptidos y proteínas bioactivas (Fig. 2E), muchas de ellas con funciones antimicrobianas, antiinflamatorias o regenerativas. Estos compuestos naturales son de gran interés para el desarrollo de aplicaciones biotecnológicas, como nuevos tratamientos contra enfermedades autoinmunes, infecciones resistentes a antibióticos, o terapias regenerativas para la piel y tejidos dañados. También pueden emplearse como ingredientes funcionales en suplementos nutricionales con propiedades inmunoestimulantes o antioxidantes.

Dado que el sistema inmunológico mucosal de los cefalópodos aún es poco conocido, este tipo de hallazgos representan un avance significativo. De hecho, recientemente se ha logrado la primera caracterización global del proteoma de la mucosidad de O. vulgaris mediante técnicas de proteómica, lo cual abre nuevas oportunidades para la investigación biomédica y acuícola (Suárez et al., 2021).

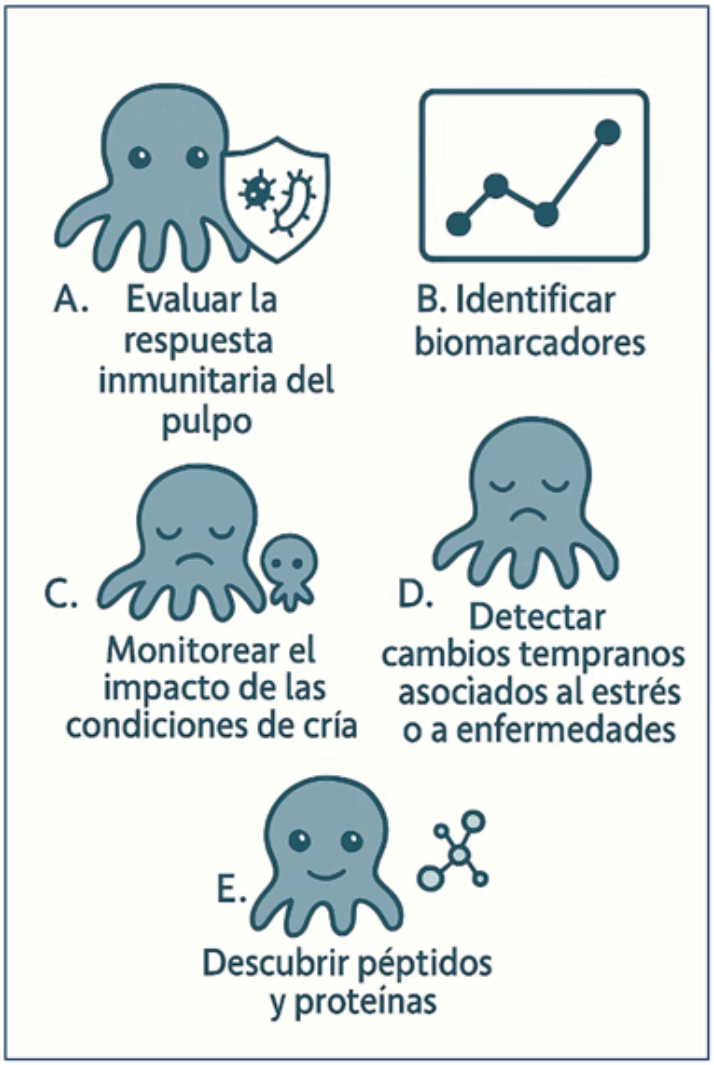


Figura 2. Aplicaciones principales del estudio de la composición de proteínas (proteoma) de la mucosidad de los pulpos. Elaboración propia con Open IA.

Conclusiones

La mucosidad de los pulpos, viscosa pero vital, no solo los protege de su entorno, sino que además representa una fuente valiosa para la innovación científica. Diversos estudios han identificado en su composición péptidos y proteínas con propiedades antimicrobianas, capaces de inhibir el crecimiento de bacterias patógenas incluso resistentes a antibióticos convencionales (Pérez-Polo et al., 2023; Savin-Amador et al., 2024). Esta capacidad la convier.te en una candidata prometedora para el desarrollo de nuevos antibióticos de origen marino. Asimismo, las propiedades regenerativas y estructurales de ciertas proteínas presentes en la mucosidad podrían aprovecharse en el diseño de biomateriales con aplicaciones en medicina, como recubrimientos para heridas o matrices para ingeniería de tejidos. Por lo tanto, el estudio de la mucosidad de O. vulgaris y Octopus bimaculatus no solo amplía nuestro conocimiento sobre la inmunidad en cefalópodos, sino que también podría ser clave para enfrentar desafíos globales en salud, biotecnología y sostenibilidad.

Referencias

Addis, M.F. (2013). Farmed and wild fish. In Proteomics in Foods (pp. 181–203). Springer Science+Business Media: New York, NY, USA.

Allam, B., Espinosa, E.P. (2015). Mucosal immunity in mollusks. In Mucosal Health in Aquaculture (pp. 325–370). Academic Press: Cambridge, MA, USA.

Anadón, R. (2019). Functional histology: The tissues of common coleoid cephalopods. In Handbook of Pathogens and Diseases in Cephalopods (pp. 39–85). Springer Nature: Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11330-8_4

Benoist, L., Houyvet, B., Henry, J., Corre, E., Zanuttini, B., Zatylny-Gaudin, C. (2020). In-depth in silico search for cuttlefish (Sepia officinalis) antimicrobial peptides following bacterial challenge of haemocytes. Marine Drugs, 18, 439. https://doi.org/10.3390/md18090439

Fernández-Alacid, L., Sanahuja, I., Ordóñez-Grande, B., Sánchez-Nuño, S., Viscor, G., Gisbert, E., Herrera, M., Ibarz, A. (2018). Skin mucus metabolites in response to physiological challenges: A valuable non-invasive method to study teleost marine species. Science of the Total Environment, 644, 1323–1335. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.083

Guardiola, F.A., Cuartero, M., Collado-González, M.M., Arizcún, M., Díaz Banos, F.G., Meseguer, J., Cuesta, A., Esteban, M.A. (2015). Description and comparative study of physico-chemical parameters of the teleost fish skin mucus. Biorheology, 52, 247–256. https://doi.org/10.3233/BIR-15052

Holst, M.-M., Hauver, C.M., Stein, R.S., Milano, B.L., Levine, L.H., Zink, A.G., Watters, J.V., Crook, R.J. (2022). Behavioral changes in senescent giant pacific octopus (Enteroctopus dofleini) are associated with peripheral neural degeneration and loss of epithelial tissue. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 271, 111263. https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2022.111263

Jereb, P., & Roper, C.F.E. (2005). No. 2. Chambered nautiluses and sepioids (Nautilidae, Sepiidae, Sepiolidae, Sepiadariidae, Idiosepiidae and Spirulidae). In Cephalopods of the World: An Annotated and Illustrated Catalogue of Cephalopod Species Known to Date (Vol. 1, pp. 204–212). Food & Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy.

Parra, D., Reyes-López, F.E., Tort, L. (2015). Mucosal immunity and B cells in teleosts: Effect of vaccination and stress. Frontiers in Immunology, 6, 354. https://doi.org/10.3389/fimmu.2015.00354

Pérez-Polo, S., Imran, M.A.S., Dios, S., Pérez, J., Barros, L., Carrera, M., Gestal, C. (2023). Identifying natural bioactive peptides from the common octopus (Octopus vulgaris Cuvier, 1797) skin mucus by products using proteogenomic analysis. International Journal of Molecular Sciences, 24, 7145. https://doi.org/10.3390/ijms24087145 Roura, A., Castro-Bugallo, A., Martínez-Pérez, M., Guerra, A. (2024). Senescence in common octopus, Octopus vulgaris: Morphological, behavioural and functional observations. Applied Animal Behaviour Science, 275, 106294. https://doi.org/10.1016/j.applanim.2024.106294 Savin-Amador, M., Hernández-Rubio, J.S., Caballero-Cosío, M.A., Rojas-Contreras, M., González-Pérez, N.F. (2024). Evaluation of the antibacterial activity of the skin mucus of the common octopus Octopus bimaculatus against pathogenic bacteria of farm animals. Revista Bio Ciencias, 11, e1521. https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1521

Schachter, H., & Williams, D. (1982). Biosynthesis of mucus glycoproteins. In Mucus in Health and Disease II (pp. 3–28). Chantler, E., Elder, J., Elstein, M. (Eds.). Plenum Press: New York, NY, USA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9254-9_1 Schmidtberg, H. (1999). Ultrastructural studies of the suckers of newly hatched Eledone moschata and Octopus vulgaris (Mollusca; Cephalopoda). In Advancing Research on Living and Fossil Cephalopods (pp. 203–221). Springer: Boston, MA, USA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4837-9_15

Fernández-Alacid, L., Sanahuja, I., Ordóñez-Grande, B., Sánchez-Nuño, S., Viscor, G., Gisbert, E., Herrera, M., Ibarz, A. (2018). Skin mucus metabolites in response to physiological challenges: A valuable non-invasive method to study teleost marine species. Science of the Total Environment, 644, 1323–1335. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.083

Guardiola, F.A., Cuartero, M., Collado-González, M.M., Arizcún, M., Díaz Banos, F.G., Meseguer, J., Cuesta, A., Esteban, M.A. (2015). Description and comparative study of physico-chemical parameters of the teleost fish skin mucus. Biorheology, 52, 247–256. https://doi.org/10.3233/BIR-15052

Holst, M.-M., Hauver, C.M., Stein, R.S., Milano, B.L., Levine, L.H., Zink, A.G., Watters, J.V., Crook, R.J. (2022). Behavioral changes in senescent giant pacific octopus (Enteroctopus dofleini) are associated with peripheral neural degeneration and loss of epithelial tissue. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 271, 111263. https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2022.111263

Jereb, P., & Roper, C.F.E. (2005). No. 2. Chambered nautiluses and sepioids (Nautilidae, Sepiidae, Sepiolidae, Sepiadariidae, Idiosepiidae and Spirulidae). In Cephalopods of the World: An Annotated and Illustrated Catalogue of Cephalopod Species Known to Date (Vol. 1, pp. 204–212). Food & Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy.

Parra, D., Reyes-López, F.E., Tort, L. (2015). Mucosal immunity and B cells in teleosts: Effect of vaccination and stress. Frontiers in Immunology, 6, 354. https://doi.org/10.3389/fimmu.2015.00354

Pérez-Polo, S., Imran, M.A.S., Dios, S., Pérez, J., Barros, L., Carrera, M., Gestal, C. (2023). Identifying natural bioactive peptides from the common octopus (Octopus vulgaris Cuvier, 1797) skin mucus by products using proteogenomic analysis. International Journal of Molecular Sciences, 24, 7145. https://doi.org/10.3390/ijms24087145

Roura, A., Castro-Bugallo, A., Martínez-Pérez, M., Guerra, A. (2024). Senescence in common octopus, Octopus vulgaris: Morphological, behavioural and functional observations. Applied Animal Behaviour Science, 275, 106294. https://doi.org/10.1016/j.applanim.2024.106294

Savin-Amador, M., Hernández-Rubio, J.S., Caballero-Cosío, M.A., Rojas-Contreras, M., González-Pérez, N.F. (2024). Evaluation of the antibacterial activity of the skin mucus of the common octopus Octopus bimaculatus against pathogenic bacteria of farm animals. Revista Bio Ciencias, 11, e1521. https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1521

Schachter, H., & Williams, D. (1982). Biosynthesis of mucus glycoproteins. In Mucus in Health and Disease II (pp. 3–28). Chantler, E., Elder, J., Elstein, M. (Eds.). Plenum Press: New York, NY, USA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-9254-9_1

Schmidtberg, H. (1999). Ultrastructural studies of the suckers of newly hatched Eledone moschata and Octopus vulgaris (Mollusca; Cephalopoda). In Advancing Research on Living and Fossil Cephalopods (pp. 203–221). Springer: Boston, MA, USA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4837-9_15

Suárez, L., Pereira, A., Hidalgo, W., Uribe, N. (2021). Antibacterial, antibiofilm and anti-virulence activity of bioactive fractions from mucus secretion of giant African snail Achatina fulica against Staphylococcus aureus strains. Antibiotics, 10, 1548. https://doi.org/10.3390/antibiotics10121548

Sobre los autores:



Macario Savin-Amador: Es profesor investigador en la Universidad Tecnológica de La Paz e investigador posdoctoral SECIHTI en el Departamento Académico de Ciencias Marinas y Costeras de la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS) trabajando con la identificación de genes resistentes a antibióticos en bacterias de origen acuáticas.



Liliana Hernández-Olalde: Profesora Investigadora del Departamento Académico de Ciencias Marinas y Costeras de la UABCS. Su línea de investigación incluye bacterias y su metabolismo impartiendo el curso de biología celular.



Oscar Trujillo-Millán: Profesor Investigador del Departamento Académico de Ciencias Marinas y Costeras de la UABCS, se especializa en estudios de biología, fisiología y ecología de peces marinos.

Cita:
Savin-Amador, M., Hernandez-Olalde, L., & Trujillo-Millán, O. (2025). Biotecnología Azul: El poder oculto de la mucosidad de los pulpos. Biotecnológica Magazine, 3(3), 34-41. https://doi.org/10.5281/zenodo.15869891

El colágeno más allá de los cosméticos: la piel de los peces es una fuente eficiente, segura y sostenible

Dra. Norma Y. Hernández Saavedra
Centro de investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Tema: Los materiales bioactivos son sustancias que interactúan con el tejido vivo para generar respuestas biológicas específicas, lo que los hace cruciales en la ingeniería de tejidos para aplicaciones como la remineralización ósea y la regeneración tisular. Entre estos materiales, el colágeno es la proteína fibrosa más abundante en la matriz extracelular y desempeña un papel vital en la reparación y regeneración tisular. Se están explorando diversos tipos de colágeno provenientes de animales y, cada vez más, de fuentes marinas como los peces, y de tilapia que es un pez que puede crecer tanto en agua dulce como marina. Por su potencial en la medicina regenerativa, la piel de pez tiene un gran potencial debido a su biocompatibilidad y eficacia para la regeneración ósea y cartilaginosa, la reparación cutánea y aplicaciones cardiovasculares y oftálmicas, particularmente para el tratamiento de quemaduras y lesiones corneales.

1. Materiales bioactivos

A las sustancias que, al entrar en contacto con los tejidos vivos, provocan una respuesta biológica específica en la interfaz material-tejido, se les conoce como materiales bioactivos. Esta respuesta puede ser positiva, como la formación de un enlace entre el material y el tejido, o negativa, como la inflamación. Los materiales bioactivos se diseñan para inducir una actividad biológica específica, como la remineralización ósea o la regeneración de tejidos. Este tipo de materiales son esenciales en la ingeniería de tejidos, ya que proporcionan estructuras de soporte que guían y sustentan las células mediante ingredientes bioactivos y moléculas terapéuticas. Estos materiales deben poseer propiedades mecánicas, biocompatibilidad y una velocidad de degradación adecuadas que se ajusten al proceso de curación del organismo para restaurar eficazmente la función tisular. La matriz extracelular (MEC), como material bioactivo natural, desempeña un papel crucial en la remodelación tisular al ofrecer señales biológicas que estimulan las respuestas celulares, lo que convierte a los sustratos derivados de la MEC en candidatos prometedores para la regeneración tisular (Zain et al., 2022).

1.1 Colágeno

Dentro de estos materiales bioactivos destaca el colágeno, que es la proteína fibrosa bioactiva más abundante en la MEC, desempeñando un papel crucial en la modulación del comportamiento celular para promover la reparación de los tejidos. Mediante interacciones con múltiples receptores, su estructura de triple hélice (Fig. 1) facilita diversas actividades celulares, como la morfogénesis y la remodelación tisular.

El colágeno se ha convertido en un material crucial para la reparación de diversos defectos tisulares gracias a sus propiedades únicas. Se

doi.org/10.5281/zenodo.15869906

ha utilizado eficazmente en la regeneración ósea mediante andamiajes mineralizados, así como en la reparación de defectos de cartílago con andamiajes de esponja reticulados y liofilizados. Además, los materiales a base de colágeno, como las membranas cargadas con fármacos y los hidrogeles, muestran resultados prometedores en la regeneración de la piel y los folículos pilosos, la reparación cardiovascular y sus aplicaciones en ginecología, cirugía plástica y regeneración corneal, lo que destaca su potencial tanto en la investigación como en la práctica clínica.

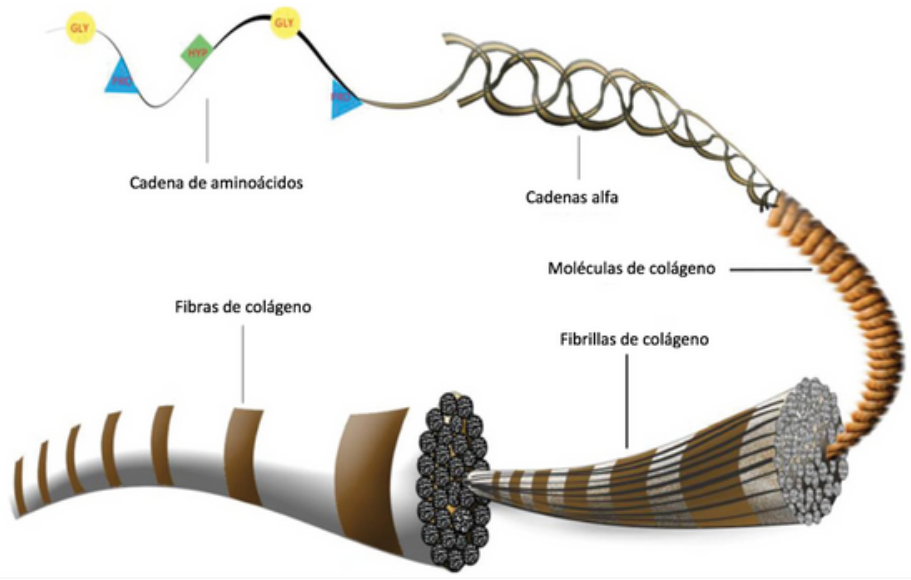


Figura 1. Esquema que ejemplifica la organización estructural del colágeno (tomado de Zhu et al., 2022).

2. Estructura básica y tipos de colágeno

2.1 Fuentes de colágeno

El colágeno es una proteína vital que puede obtenerse de diversos materiales, como la piel animal, los tendones y la piel de pescado; también puede obtenerse mediante la producción de proteínas recombinantes y péptidos sintéticos. Si bien el colágeno de cerdos, vacas y ovejas se utiliza comúnmente en investigación debido a su asequibilidad y alto rendimiento, presenta desafíos como su limitada solubilidad, inmunogenicidad y potencial de transmisión de patógenos.

Estos problemas han impulsado la exploración de nuevas tecnologías para desarrollar fuentes alternativas de colágeno con propiedades mejoradas (Zhu et al., 2022).

La investigación sobre colágeno marino, colágenos recombinantes humanos y péptidos sintéticos similares al colágeno destaca el potencial de la piel de pescado como fuente rentable de colágeno, lo que puede mejorar el aprovechamiento de residuos y promover un entorno marino más limpio. A pesar del creciente interés en el colágeno marino para diversas aplicaciones, son escasos los estudios centrados en su uso en ingeniería de tejidos. Si bien el colágeno recombinante y los péptidos sintéticos ofrecen ventajas como menor variabilidad de lotes y menor inmunogenicidad (en comparación con el colágeno de origen animal), aún existen desafíos para la aplicación clínica de las proteínas recombinantes, particularmente, debido a sus altos costos de producción, bajo rendimiento y su alta susceptibilidad a la degradación enzimática. Las diferentes fuentes de colágeno y sus características se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Diferentes fuentes y propiedades del colágeno (modificado de Zhu et al., 2022).

Tipo de colágeno	Propiedades	Desventajas
Colágeno cutáneo (de piel animal: vaca, oveja, cerdo, etc.)	Costo bajo	Variabilidad en los lotes
	Alto rendimiento	Inmunogenicidad potencia
Colágeno del tendón de Aquiles (de animales)	Alta resistencia	Riesgo de transmisión de patógenos
Colágeno de cola de rata	Alta resistencia	Baja solubilidad
Colágeno de piel de peces	Cantidad abundante en los océanos (sostenible) Bajo costo	Estudios limitados
Colágeno recombinante	Producción de un tipo especial de colágeno Baja respuesta inmunitaria Sin variabilidad entre lotes	Alto costo Bajo rendimiento Problemas de estabilidad Susceptibilidad proteolítica
Colágeno sintético (péptidos sintéticos similares al colágeno)	Baja respuesta inmunitaria Solubilidad	Alto coste Bajo rendimiento Problemas de ensamblaje Función biológica insuficiente

2.2 Tipos de colágeno

Los diferentes tipos de colágeno se nombran según su fecha de descubrimiento. Se clasifican principalmente en diferentes subfamilias según su estructura y función (Tabla 2). Las subfamilias incluyen colágenos fibrilares, colágenos asociados a fibrillas con triples hélices interrumpidas, colágeno formador de filamentos en forma de perla, colágenos de la membrana basal, colágenos transmembrana y otros colágenos con funciones únicas (Antunez-Medina et al., 2024; Zhu et al., 2022). Los colágenos fibrilares constituyen el 90% del colágeno total y representan la familia de colágenos más extendida y abundante, e incluye los colágenos tipo I, tipo II, tipo III, tipo V y tipo XI. Estos colágenos se caracterizan por su capacidad de ensamblarse en agregados supramoleculares altamente orientados con superestructuras características. Las fibras de colágeno tipo I y tipo V contribuyen al esqueleto estructural del hueso, mientras que el colágeno tipo II y tipo XI participan principalmente en la formación de la matriz fibrosa del cartílago articular. El colágeno tipo III se distribuye ampliamente en los tejidos que contienen colágeno I, con la excepción del hueso. El colágeno humano recombinante tipo III también se utiliza como tinta de impresión tridimensional (3D) para producir capas delgadas reticuladas para la ingeniería de tejidos corneales. Diferentes tipos de colágeno también afectan o causan enfermedades genéticas en humanos. Por ejemplo, una mutación en el exón del gen COL2A1 del colágeno tipo II resulta en necrosis avascular de la cabeza femoral. Las distrofias musculares congénitas relacionadas con el colágeno VI son causadas por mutaciones en cualquiera de los tres genes que codifican el colágeno tipo VI (COL6A1, COL6A2, COL6A3).

Tabla 2. Diferentes tipos de colágeno organizados en diversas supraestructuras (modificado de Antunez-Medina et al., 2024; Zhu et al., 2022).

Supraestructura	Familias de colágeno	Función
Fibrilla	I, II, III, V, XI	Se ensamblan en agregados supramoleculares altamente orientados (superestructuras características)
	I, V	Contribuyen en la estructura del hueso
	II, XI	Forman parte de la matriz fibrosa del cartílago articular
	III	Se distribuye ampliamente en los tejidos que contienen colágeno I, con excepción del hueso
	V	Forma heterofibrillas con colágenos tipo I y III y contribuye a la matriz ósea orgánica, al estroma corneal y a la matriz intersticial de los músculos, el hígado, los pulmones y la placenta.
	XXIV, XXVII	Matriz extracelular, fibras de soporte
Fibrilla asociada	IX, XII, XIV, XVI, XIX, XX, XXI, XXII	Estabiliza la red y regula el tamaño de las fibras de colágeno
Red	IV, VI, VIII, X	Importantes en el músculo esquelético
Fibrillas de anclaje	VII	Adhesión de la lámina a las fibras de tejido conjuntivo
Colágeno transmembranal	XIII, XVII, XXIII, XXV	Interactúa con los colágenos XII y XXV; se expresan en neuronas
Multiplexina	XV, XVII	Adhesión de la lámina basal al tejido conjuntivo subyacente; estabiliza la estructura del hemidesmosoma

3. Desarrollo de biomateriales a base de colágeno

El colágeno natural es muy adecuado para la integración tisular gracias a sus características únicas. Sin embargo, los procesos de extracción, purificación y síntesis suelen comprometer su integridad estructural y sus propiedades mecánicas, lo que reduce su durabilidad y limita sus aplicaciones en biotecnología (Zain y Hamdan, 2021). Para abordar estos desafíos, se han desarrollado diversas estrategias para reconstruir y mejorar la estructura y las propiedades de los biomateriales a base de colágeno (Fig. 2).

3.1 Colágeno reticulado

Considerando que la vía natural de reticulación del colágeno no se produce *in vitro*, se introduce la reticulación exógena para optimizar los materiales a base de colágeno (Delgado et al., 2015). Esta reticulación adicional evita que las moléculas de colágeno se deslicen entre sí bajo tensión, aumentando así la resistencia mecánica de las fibras de colágeno. Los métodos comunes de reticulación se describen brevemente a continuación, sin embargo, actualmente aún no hay métodos de reticulación estandarizados para preparar una matriz de colágeno fuerte y biocompatible (Fig. 2-1).

Se han descrito varios métodos de reticulación, entre las que se pueden mencionar: 1) El método físico, en el que se usa radiación ionizante, luz ultravioleta (UV), tratamiento térmico de deshidrogenación (DHT) o fotooxidación; se considera un método simple y seguro para preparar una matriz de colágeno reticulado. 2) El método químico, los agentes más utilizados son los aldehídos, ya que se ha demostrado que el glutaraldehído estabiliza ampliamente los materiales de colágeno



Figura 2. Esquema en el que se representan ejemplos del desarrollo de biomateriales a partir de colágeno y sus campos de aplicación (tomado de Zhu et al., 2022).

debido a su gran capacidad de autopolimerización, pero su uso aún es controvertido debido a su toxicidad. Por ello, las investigaciones se han enfocado en estrategias alternativas como el uso de dialdehído con nanopartículas a base de almidón. 3) Los métodos enzimáticos; en los últimos años este tipo de reticulación se ha usado ampliamente debido a su excelente especificidad y cinética de reacción precisa. Recientemente, se creó un andamio híbrido compuesto por dos biopolímeros (colágeno y quitosano) y se comparó su reticulación con glutaraldehído y tres métodos de reticulación diferentes (genipina -químico-; temperatura -físico-; y transglutaminasa -enzimático-), encontrándose que la reticulación enzimática evita las desventajas de la reticulación física y química, pero aun es muy costosa (Perez-Puyana et al., 2019).

3.2 Colágeno mineralizado

El colágeno mineralizado es un material compuesto orgánico-inorgánico formado por moléculas de colágeno y nanominerales de fosfato de calcio. Los compuestos de colágeno biomineralizado tienen el potencial de utilizarse como sustitutos de los implantes óseos sintéticos actuales, ya que proporcionan componentes biomiméticos muy similares al hueso natural (Fig. 2-2). Actualmente, se están investigando métodos de mineralización más eficaces y mecanismos de mineralización más

detallados. Song et al. (2019) encontraron que el ácido poliacrílico (PAA) es capaz intrafibrilar más eficazmente al almacenar complejos de iones de calcio y fosfato de hidrógeno en agregados en forma de cadena a lo largo de la superficie de la macromolécula de colágeno cuando se introduce en un medio de mineralización de fosfato de calcio sobresaturado (CaP) en presencia de una alta concentración de los precursores (Oosterlaken et al., 2021).

3.3 Mezclas a base de colágeno

Se pueden preparar mezclas a partir de polímeros sintéticos y naturales, así como de dos (o más) biopolímeros. Lo que se busca es desarrollar una nueva clase de materiales con propiedades mecánicas y biocompatibilidad mejoradas, en comparación con un material de un solo componente, esperando que las mezclas a base de colágeno permitan preparar hidrogeles complejos con un rendimiento práctico mejorado (Fig. 2-3). Chen et al. (2020) diseñaron un hidrogel bioortogonal de ácido hialurónico-colágeno para la reparación de defectos corneales sin sutura. Sus resultados mostraron propiedades mecánicas mejoradas, una excelente citocompatibilidad y apoyo en la formación del epitelio *in vitro* e *in vivo*. Rafat et al. (2019) desarrollaron hidrogeles compuestos a base de colágeno como implantes para restaurar la transparencia corneal, que a la vez sirven como posible reservorio de células y fármacos.

3.4 Colágeno estructurado

En las últimas dos décadas, los problemas asociados con la regeneración de las fibras de colágeno natural incluyen la incapacidad de alcanzar suficiente resistencia a la tracción y replicar o reproducir la estructura fibrilar interna debido a la pérdida de las propiedades de las jerarquías propias del colágeno natural. La tecnología moderna permite fabricar andamios de colágeno altamente ordenados o una matriz con una estructura similar a la presente en los organismos vivos (Fig. 2-4). La impresión 3D es una de las tecnologías de fabricación aditiva más conocidas en el campo de la biofabricación de tejidos y órganos. En comparación con las técnicas tradicionales, la impresión 3D ofrece la posibilidad de crear estructuras replicables, personalizables y funcionales con una composición y microestructura controladas con precisión, que pueden promover eficazmente la regeneración de diferentes tejidos (Lee et al., 2019).

3.5 Vehículos de administración basados en colágeno

Las suspensiones de colágeno se pueden preparar y utilizar fácilmente como vectores de administración de macro- y micromoléculas de fármacos (Fig. 2-5). Métodos como la extracción con fluidos supercríticos, la electropulverización, el secado por pulverización, el autoensamblaje capa por capa, la liofilización y la microemulsificación permiten introducir fármacos en los sistemas de administración (Jacob et al., 2018).

4. Aplicaciones de los biomateriales basados en colágeno

En la Tabla 3 se resumen las diferentes formas adaptativas de colágeno aplicadas en diferentes campos de reparación tisular. Los materiales bioactivos a base de colágeno también tienen buenas perspectivas en gineco-

Tabla 3. Morfología adaptativa y características del colágeno en diferentes campos de aplicación (Fig. 2A-E) (modificado de Zhu et al., 2022).

Campo de aplicación	Forma del colágeno	Características
Hueso	Colágeno mineralizado	Fase inorgánica/orgánica adecuada
	Andamiajes de fabricación aditiva	Forma adaptable
		Resistencia mecánica
Cartílago	Hidrogel	Cartílago biónico
	Esponja liofilizada	Diferenciación del cartílago
	Colágeno reticulado	Reparación a largo plazo
Piel	Hidrogel	Antiinflamatorio
	Textiles protectores de la piel	Resistencia a la contracción
	Apósitos de colágeno para heridas	Propiedades mecánicas mejoradas
	Colágeno concentrado	Tratamiento farmacológico
Cardiovascular	Hidrogel	Requerimientos mecánicos (resistencia y elasticidad)
	Membrana/película de colágeno	Durabilidad
	Recubrimiento	Resistencia a la calcificación

logía, la medicina reproductiva, la reparación plástica y la regeneración corneal (Fig. 2A-E).

4.1 La biotecnología del colágeno

La biotecnología juega un papel fundamental en la producción y mejora del colágeno, ofreciendo soluciones sostenibles y eficaces para diversas aplicaciones, desde la medicina regenerativa hasta la industria cosmética. Entre las aplicaciones mas relevantes de la biotecnología en el colágeno podemos mencionar:

1. **Producción Sostenible.** La biotecnología permite obtener colágeno de fuentes alternativas a las tradicionales, como la fermentación microbiana o el cultivo celular, lo que reduce la dependencia de animales y mejora la sostenibilidad de la producción.
2. **Colágeno Recombinante.** La biotecnología permite producir colágeno recombinante, que imita las propiedades del colágeno humano y es altamente puro, lo que lo hace ideal para aplicaciones médicas y farmacéuticas.
3. **Ingeniería Tisular.** El colágeno, producido por biotecnología, se utiliza en la ingeniería de tejidos para crear andamios biológicos que promueven la regeneración de tejidos dañados, como huesos, cartílagos o piel.
4. **Industria Cosmética.** La biotecnología ofrece colágeno vegano y de alta calidad para la industria cosmética, que se utiliza en productos para el cuidado de la piel, cabello y uñas, mejorando su hidratación, elasticidad y firmeza.
5. **Medicina Regenerativa.** El colágeno biotecnológico se utiliza en la medicina regenerativa para promover la curación de heridas, la reparación de tejidos y la regeneración de órganos.
6. **Producción de Péptidos.** La biotecnología se utiliza para obtener péptidos de colágeno, que pueden ser utilizados como suplementos alimenticios con beneficios para la salud.

4.2 La medicina regenerativa basada en colágeno.

4.2.1 El uso de piel de peces como fuente de colágeno, caso estudio: la tilapia

Las pieles de los peces, que generalmente son un desecho de la pesquería o su cultivo, se pueden utilizar para extraer colágeno y maximizar la rentabilidad de su procesamiento. La tilapia (*Oreochromis niloticus*) es un pez originario de África que puede reproducirse tanto en agua dulce como en agua salada (CMUC, 2019). Por las bondades de su crecimiento, su cultivo en agua dulce se ha extendido ampliamente, como una estrategia para abatir el hambre en países o localidades poco desarrolladas, sin embargo, en algunos sitios ha llegado a ser una plaga ya que arrasa con las poblaciones nativas de peces. Sin embargo, la piel de la tilapia se ha estudiado ampliamente debido a su potencial para sustituir el colágeno de mamíferos con fines biomédicos, gracias a su mayor estabilidad térmica en comparación con otras fuentes marinas. La piel de *O. niloticus*, por su alto contenido en ácidos grasos, colágenos tipo I y III y su capacidad para retener la humedad, se ha convertido en el blanco perfecto para su uso en quemados (BBC Mundo, 2017; CMUC, 2019).

Además, debido a sus grandes propiedades de biocompatibilidad y biodegradabilidad, la piel de tilapia se usa frecuentemente como materia prima para la obtención de colágeno como biomaterial para su aplicación en ingeniería de tejidos, principalmente para producir piel, hueso/dentina, y tejidos neural y corneal (Zain y Hamdan, 2021; Zahin, 2022).

doi.org/10.5281/zenodo.15869906

4.2.1.1 El uso de piel de tilapia para el tratamiento de quemaduras

En el 2014, en Brasil se realizaron los primeros estudios del uso de piel de tilapia para el tratamiento de quemaduras de 2do y 3er grado. El Dr. Edmar Maciel que es cirujano plástico y Director del Instituto de Apoyo al Quemado coordinó el equipo interdisciplinario que desarrolló el método (BBC Mundo, 2017). Expertos como el veterinario Flavio Vieira Meirelles destacan el valor del colágeno en la estimulación de la regeneración celular, un factor clave en la recuperación de tejidos. Aunque ya existen técnicas similares con tejidos derivados de placenta o válvulas cardíacas animales, la piel de tilapia destaca por su disponibilidad, bajo costo y efectividad comprobada. La piel de la tilapia, una vez limpia y esterilizada, se coloca en las zonas afectadas por quemaduras de forma estéril, pudiendo permanecer sin ser retirada hasta 10 días (Fig. 3).

Los estudios realizados en Brasil demostraron que los pacientes (humanos) afectados que reciben la piel de tilapia consumen menos analgésicos que los que siguen el tratamiento convencional, además, la cicatrización de las heridas se consigue de manera más rápida y natural. Hay que comentar que el proceso de cicatrización de las quemaduras puede dividirse en 4 fases: coagulación o hemostasia, inflamación, proliferación y maduración.

Los estudios realizados *in vitro* e *in vivo* demuestran que en las heridas tratadas con piel de tilapia favorecen la fase proliferativa, aumentando la migración y regeneración celular. De esta manera, el depósito de colágeno se observa al 7mo día, y el epitelio se regenera completamente después de 14 días; y las heridas tratadas se curan completamente para el día 21.

Debido al éxito de este procedimiento, en el año en que se quemó el Pantanal (el humedal más grande del mundo que se extiende principalmente por el estado brasileño de Mato Grosso del Sur y partes aledañas de Bolivia y Paraguay) y muchos de sus animales se quemaron y otros quedaron heridos, investigadores y veterinarios se unieron para ayudar a la fauna silvestre lesionada usando la piel de tilapia. El tratamiento experimental se aplicó a una corzuela parda (un tipo de ciervo) (Fig. 3-6), dos tapires adultos y un bebé, un oso hormiguero gigante adulto, una serpiente anaconda y un tuiuiu, el pájaro símbolo del Pantanal con éxito (BBC Mundo, 2020). Debido a esto, este tratamiento se ha aplicado también a otros animales (Fig. 3-7) (Yo veterinario, 2025).

4.2.1.2 Piel de tilapia para el tratamiento de lesiones corneales en perros

La piel de tilapia también ha demostrado ser un poderoso recurso en la medicina veterinaria. Investigadores brasileños de la Universidad Federal de Ceará desarrollaron una técnica innovadora en la que se utiliza esta piel como "parche" biológico para tratar lesiones graves en la córnea de perros, con sorprendentes resultados en la regeneración ocular (Fig. 4). Para que el injerto sea seguro, los investigadores desarrollaron un riguroso proceso de descontaminación y descelularización (de Souza Melo et al., 2022). Mediante pruebas químicas, enzimáticas e histológicas, lograron eliminar más del 90 % del ADN celular sin dañar la estructura del



Figura 3. Uso de la piel de tilapia para el tratamiento de quemaduras de 2do y 3er grado. 1) Tilapia en cultivo (O. niloticus). 2) Pasos para la obtención de piel de tilapia. 3) Preparación de la piel para generar los parches de queratina (se eliminan escamas y tejidos conectivo y muscular, se esterilizan cortan en porciones de 5 x10 cm). 4) Los apósitos biológicos se esterilizan e almacenan al vacío y en refrigeración hasta por dos años. 5) Infante quemaduras de 3er grado tratada con apósitos de tilapia. 6) Corzuela parda tratada por quemaduras sufridas en el incendio del Pantanal (Brasil). 7). La piel esterilizada de tilapia se sutura a la mano quemada de un león para ayudar al proceso de cicatrización. Elaborado a partir de CMUC, 2019; García 2017, BBC Mundo 2020; Yo veterinario, 2025.

colágeno, garantizando así la biocompatibilidad del material. Además, se realizaron estudios de citotoxicidad para asegurar que no quedan residuos tóxicos tras el proceso de limpieza (Cebero Digital, 2025).

Actualmente, el equipo está adaptando esta matriz dérmica para su uso en humanos. Los ensayos clínicos están en preparación, y la técnica ya ha sido presentada en congresos médicos y veterinarios con gran aceptación. Además de la oftalmología, otras especialidades como urología, neurología y cirugía general están evaluando el potencial del injerto.

tejidos. Su mayor estabilidad térmica y su composición de aminoácidos, prolina e hidroxiprolina, los convierten en un candidato ideal para reemplazar el colágeno de mamíferos. Además, se ha demostrado que sus propiedades de biocompatibilidad, biodegradabilidad, inmunogenicidad y hemostasia son comparables a las del colágeno de mamíferos. Por lo tanto, se necesitan más experimentos para explorar su potencial como sustituto del colágeno de mamíferos en aplicaciones ingeniería de tejidos.

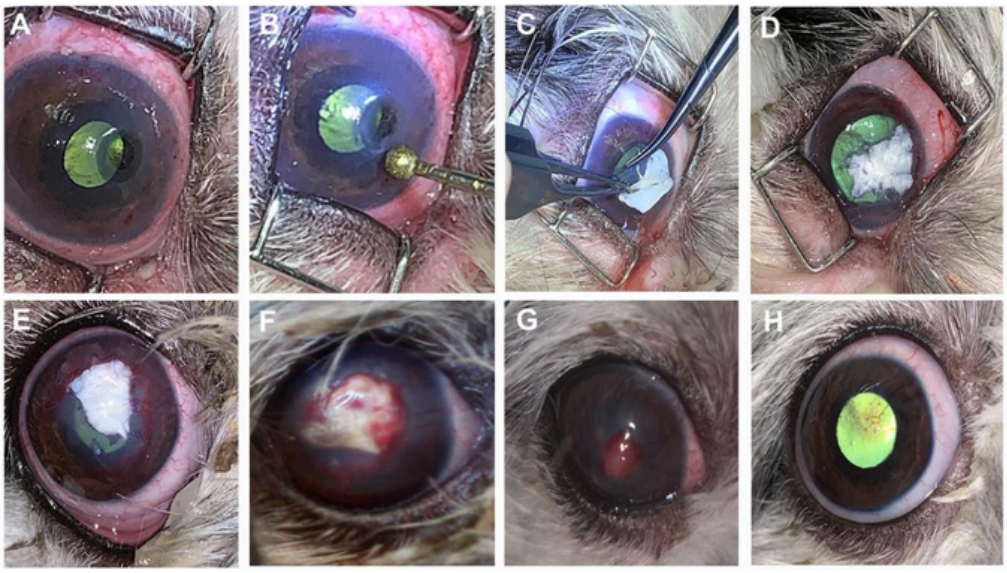


Figura 4. Queratoplastia con piel de tilapia en un perro doméstico (Canis lupus familiaris), imágenes de evolución de la cicatriz desde el momento inicial hasta 120 días de evolución. A) lesión corneal en el día 01, B) apariencia transquirúrgica inicial, C) aspecto transquirúrgico intermedio, D) apariencia transquirúrgica final, E) postoperatorio a los 10 días, F) postoperatorio 30 días, G) postoperatorio a los 60 días, y H) postoperatorio después de 120 días (tomado de Souza Melo et al., 2022).

5. Conclusiones

Los colágenos de tilapia y otras fuentes marinas poseen propiedades químicas y biológicas idóneas para su uso como biomateriales en aplicaciones ingeniería de

6. Referencias

Antunez-Medina J. R., et al. 2024. Usos o funciones del colágeno en los alimentos. Biotecnológica Magazine, 2(5), 23–30.

BBC Mundo. 2017. El revolucionario método desarrollado en Brasil para tratar quemaduras graves con piel de tilapia. BBC News Mundo. Consultado 13/05/2025.

BBC Mundo. 2020. Incendios en Brasil: las extraordinarias imágenes de animales quemados tratados con piel de tilapia. BBC News Mundo. Consultado 15/05/2025.

CMUC. 2019. Piel de tilapia para el tratamiento de quemaduras. C.M.U.C. Consultado 13/05/2025.

Cerebro Digital. 2025. La piel de tilapia: un tratamiento inesperado para tratar lesiones oculares en perros y gatos. Cerebro Digital. Consultado 13/05/2025.

Chen F., et al. 2020. Bioorthogonally crosslinked hyaluronate-collagen hydrogel for suture-free corneal defect repair. Biomaterials, 255:120176.

de Souza Melo M., et al. 2022. Enxerto de pele de tilápia (*Oreochromis niloticus*) em reparo de úlcera em córnea de cão: relato de caso Tilapia (*Oreochromis niloticus*). BJAER, 5(1):367-375.

Delgado L.M., et al. 2015. To cross-link or not to crosslink? Cross-linking associated foreign body response of collagen-based devices. Tissue Eng Part B Rev, 21(3):298–313.

García P. 2017. En Brasil, un estudio experimental aplica piel de peces para curar quemaduras. La Nación. Consultado 15/05/2025.

Jacob J., et al. 2018. Biopolymer based nanomaterials in drug delivery systems: a review. Mater Today Chem., 9:43–55.

Lee A., et al. 2019. 3D bioprinting of collagen to rebuild components of the human heart. Science, 365(6452):482–7.

Oosterlaken B.M., et al. 2021. *In vitro* mineralization of collagen. Adv Mater., 33(16):e2004418.

Perez-Puyana V., et al. 2019. Crosslinking of hybrid scaffolds produced from collagen and chitosan. Int J Biol Macromol., 139:262–9.

Rafat M., et al. 2016. Composite core-and-skirt collagen hydrogels with differential degradation for corneal therapeutic applications. Biomaterials, 83:142–55.

Song Q., et al. 2019. Contribution of biomimetic collagen-ligand interaction to intrafibrillar mineralization. Sci Adv., 5(3):eaav9075.

Yo veterinario. 2025. Facebook. Consultado 15/05/2025.

Zain N.M. et al. 2020. Properties of Tilapia Collagen as a Biomaterial for Tissue Engineering: A Review. IOP Conf. Ser.; Mater Sci Eng, 932 012021.

Zain N.M., Hamdan M.N. 2021. Tilapia fish collagen: Potential as halal biomaterial in tissue engineering applications. Nusantara Halal J, 2(1):24–32.

Zhu J., et al. 2022. Advanced application of collagen-based biomaterials in tissue repair and restoration. J Leather Sci Eng, 4, 30.



Dra. Norma Y. Hernández Saavedra. Investigadora Titular, CIBNOR. Sistema Nacional de Investigadores Nivel 2. Scopus, Research Gate, ORCID, Academia.

Cita:
Hernández Saavedra, N. Y. (2025). El colágeno más allá de los cosméticos: la piel de los peces es una fuente eficiente, segura y sostenible. Biotecnológica Magazine, 3(3), 42-52. https://doi.org/10.5281/zenodo.15869906

Innovaciones en Acuicultura: Hongos y sus Compuestos Bioactivos

Felipe Ascencio
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
ascencio@cibnor.mx

Tema. Las innovaciones en acuicultura implican cada vez más el uso de hongos y sus compuestos bioactivos para mejorar la sostenibilidad y la productividad. Los hongos ofrecen múltiples beneficios, que incluyen la promoción del crecimiento, la mejora de la inmunidad, la resistencia a las enfermedades y la biorremediación, lo que los hace valiosos en las prácticas de acuicultura sostenible.

1. Introducción

Los hongos desempeñan un papel multifacético en la acuicultura, contribuyendo al crecimiento, la mejora de la inmunidad, la resistencia a las enfermedades y la biorremediación de los desechos. También mejoran la utilización de los ingredientes de las plantas terrestres al reducir las fracciones de fibra y los factores antinutricionales, al tiempo que aumentan el contenido de nutrientes y minerales, mejorando así la calidad general de los alimentos acuícolas (Onomu y Okuthe, 2024). En general, las funciones de los hongos en la acuicultura pueden clasificarse de la siguiente manera:

i. *Mejora del crecimiento y nutrición*: los hongos mejoran la utilización de ingredientes de origen vegetal en los alimentos para la acuicultura al reducir los factores antinutricionales y aumentar el contenido de nutrientes. También mejoran la flotabilidad de los alimentos para la acuicultura, lo que es beneficioso para la eficiencia alimentaria (Onomu y Okuthe, 2024). Los hongos contribuyen al crecimiento y la salud de los animales acuáticos al actuar como probióticos.

ii. Inmunidad y resistencia a las enfermedades: Inmunidad y defensa contra enfermedades: los compuestos bioactivos presentes en los hongos, como los mano-oligosacáridos y los β-glucanos, funcionan como prebióticos que potencian la inmunidad innata y mejoran la resistencia a enfermedades en los peces. Estos compuestos ayudan a mantener la salud intestinal y a prevenir la disbiosis, que es crucial en las condiciones de cultivo. Esto es particularmente importante ya que las restricciones a los antibióticos en la acuicultura requieren métodos alternativos para el control de enfermedades (Ghosh et al., 2023).

iii. *Biorremediación y biofloculación*: los hongos ayudan en la biorremediación de desechos y la biofloculación, que son cruciales para mantener la calidad del agua en los sistemas de acuicultura al descomponer la materia orgánica y reducir los contaminantes. Esto contribuye a una práctica acuícola más sostenible y respetuosa con el medio ambiente (Ghosh et al., 2023; Onomu y Okuthe, 2024).

doi.org/10.5281/zenodo.15869917

Tabla 1. Metabolitos secundarios de hongos disponibles comercialmente para su uso en el desarrollo de la acuicultura sostenible.

Producto	Ingrediente Activo	Beneficios	Fabricante
Metabolitos secundarios			
Fermacto™	Ácidos orgánicos (láctico, cítrico), enzimas.	Mejora la digestión y reduce el pH para inhibir patógenos.	Alltech Aquaculture (https://www.alltech.com/resources/product-technical-sheets/fermacto)
Biomaster™	Metabolitos de fermentación fúngica	Actividad antimicrobiana, mejora la calidad del agua	BiomCare (India) (https://www.biomcare.com/aquaculture.html)
Aspergillus oryzae	Enzimas (proteasas, amilasas)	Mejoran la absorción de nutrientes y reducen los costos de alimentación.	DSM Nutritional Products (https://www.dsm.com/animal-nutrition/enzymes.html)
Probiotics (Live Microbes)			
AquaStar®	*Saccharomyces cerevisiae* + *Bacillus* spp.	Mejora la digestión, el control de patógenos y la inmunidad.	Lallemand Animal Nutrition www.lallemandanimalnutrition.com/aquaculture/aquast
YeaSacc®	*S. cerevisiae* 1026	Estabiliza la flora intestinal y mejora la eficiencia alimentaria.	Alltech Aquaculture https://www.alltech.com/resources/product-technical-sheets/yeasacc-1026
Aquabalance™	*Debaryomyces hansenii*	Reduce el estrés y mejora las tasas de supervivencia.	BiomCare (India) (https://www.biomcare.com/aquaculture.html)
BioYeast™	*S. cerevisiae*	Mejora el crecimiento y la resistencia a las enfermedades.	VitalAqua (Spain) (https://www.vital-aqua.com/products)
Prebiotics (Non-Digestible Substrates)			
Bio-Mos®	Oligosacáridos de manano (MOS) de *S. cerevisiae*	Exclusión de patógenos, refuerzo de la inmunidad	Alltech Aquaculture (https://www.alltech.com/)
BetaGlycan™	Betaglucanos de las paredes celulares de levadura.	Estimulación inmunitaria y resistencia a enfermedades.	Biorigin (Brazil) (https://www.biorigin.com.br/)
Actigen®	MOS de segunda generación de *S. cerevisiae*.	Mejora la salud intestinal y la absorción de nutrientes.	Alltech Aquaculture (https://www.alltech.com/)
FermOra™	Prebióticos derivados de levadura (mananos, glucanos).	Favorecen la colonización probiótica.	Phileo (Lesaffre Group) (https://www.phileo.com/)
Immunobiotics (Immune-Stimulating Microbes)			
Immunovia™	*S. cerevisiae*	Mejora la inmunidad innata y la resistencia a las enfermedades.	Lallemand Animal Nutrition (https://www.lallemandanimalnutrition.com/)
ImmuWall®	Betaglucanos de las paredes celulares de la levadura.	Activa los macrófagos y tiene actividad antiviral.	Biorigin (Brazil) (https://www.biorigin.com.br/)
MacroGard®	Betaglucanos 1,3/1,6 de *S. cerevisiae*	Activación del sistema inmunológico	Bently Pharmaceuticals (https://www.bentleypharma.com/)
Aquagut™	*S. cerevisiae* + Betaglucanos	Apoyo sinérgico para la salud inmunitaria e intestinal.	VitalAqua (Spain) (https://www.vital-aqua.com/)
Antimicrobial Peptides (AMPs)			
Cimenol Ring™	Terpenoide derivado de hongos (Cimenol).	Antimicrobiano de amplio espectro.	Orffa Additives (https://www.orffa.com/)
Biotop™	Ácidos orgánicos (sórbico, benzoico) de levadura.	Inhibe patógenos bacterianos y fúngicos.	Lallemand Animal Nutrition (https://www.lallemandanimalnutrition.com/)
Vitamins from Fungi/Yeast			
Yeast Fortified with B-Vitamins	*S. cerevisiae* enriquecido con B1, B2, B6, B12	Favorece el metabolismo energético y el crecimiento.	Fortified Yeast for Aquaculture (https://www.phileo.com/applications/aquaculture)
Deli-Vit® Aqua	Complejo vitamínico (B12, D3, E) con portadores de levadura.	Mejora la inmunidad y la pigmentación.	DSM Nutritional Products (https://www.dsm.com/)
Yeast-Plus™	*S. cerevisiae* con vitaminas añadidas.	Mejora la palatabilidad del alimento y la absorción de nutrientes.	VitalAqua (Spain) (https://www.vital-aqua.com/)
Pigments			
Carophyll®	Astaxanthina de *Phaffia rhodozyma*	Mejora la pigmentación roja/rosa en salmón, trucha y camarones; propiedades antioxidantes.	DSM Nutritional Products (https://www.dsm.com/)
NatuRose®	Astaxanthina de *Xanthophyllomyces dendrorhous*	Pigmento natural para peces y camarones; favorece el color de la piel y la carne, así como la salud inmunológica.	BASF Animal Nutrition (https://www.basf.com/)
Lucantin® Aurantio	Betacaroteno de *Blakeslea trispora*	Pigmentación amarillo-anaranjada; precursor de la vitamina A; actividad antioxidante.	BASF Animal Nutrition (https://www.basf.com/)
BioAstin Aqua	Astaxanthina de *Phaffia rhodozyma*	Pigmento natural para salmónidos y crustáceos; mejora la resistencia al estrés.	BioAstin Aqua Product Info (https://www.hawaiibio.com/aquaculture)
TorulaRed™	Torulene, Torularhodina de *Rhodotorula glutinis*	Pigmentación roja/naranja; alternativa natural a los carotenoides sintéticos	Phileo (Lesaffre Group) (https://www.phileo.com/)
Aquacaroten™	Astaxanthina de *X. dendrorhous*	Mejora el color de la carne en peces y camarones; favorece el crecimiento y la inmunidad.	Lallemand Animal Nutrition (https://www.lallemandanimalnutrition.com/)
Canthiguard®	Cantaxantina de Phaffia rhodozyma (cepa modificada genéticamente).	Pigmento rojo para peces ornamentales y comestibles; mejora la fertilidad y la resistencia a enfermedades.	DSM Nutritional Products (https://www.dsm.com/)

2. Los hongos en la acuicultura

2.1 Mejora del crecimiento y la nutrición

Los hongos y sus metabolitos secundarios ofrecen vías prometedoras para mejorar la disponibilidad de nutrientes y la sostenibilidad en la acuicultura. Proporcionan fuentes de proteínas alternativas, mejoran la digestibilidad de los alimentos y ofrecen beneficios probióticos, lo que contribuye a prácticas acuícolas más saludables y sostenibles.

Los hongos mejoran el perfil nutricional de los alimentos acuícolas al reducir las fracciones de fibra y los factores antinutricionales, al tiempo que aumentan el contenido de nutrientes y minerales. Esto hace que los ingredientes de origen vegetal sean mejor asimilados como alimentos acuícolas. Estas innovaciones no solo abordan los desafíos de la harina de pescado tradicional, sino que también promueven soluciones acuícolas respetuosas con el medio ambiente. Por otro lado, los hongos pueden mejorar la flotabilidad de los alimentos acuícolas, asegurando que permanezcan accesibles para los organismos acuáticos. Además, los pigmentos fúngicos pueden mejorar la coloración de los filetes de pescado, haciéndolos más atractivos para los consumidores (Onomu y Okuthe, 2024).

a) Mejora de los nutrientes mediante hongos

- Utilización mejorada de los nutrientes: los hongos pueden mejorar la idoneidad de los ingredientes vegetales terrestres en la acuicultura al reducir las fracciones de fibra y los factores antinutricionales, aumentando así el contenido de nutrientes y minerales de estos ingredientes (Onomu y Okuthe, 2024). Esto hace que los alimentos vegetales sean más digeribles y nutritivos para los animales acuáticos.
- Fuentes de proteínas alternativas: los hongos filamentosos cultivados en corrientes de desechos orgánicos pueden servir como fuentes alternativas ricas en proteínas para los alimentos para peces, ofreciendo un alto contenido de proteínas y aminoácidos esenciales comparables a la harina de pescado convencional (Karimi et al., 2019). Este enfoque aborda los desafíos de la escasez de harina de pescado y las preocupaciones ambientales.
- Producción de biomasa: la biomasa fúngica, como la de Aspergillus oryzae y Neurospora intermedia, se puede producir a partir de subproductos industriales como la vinaza, lo que proporciona un suplemento alimenticio sostenible y rico en nutrientes con un alto contenido de proteínas y lípidos (Karimi et al., 2019).

b) Metabolitos secundarios y probióticos

- Propiedades probióticas: los hongos y sus metabolitos secundarios, como los oligosacaridos y polisacaridos complejos derivados de la pared celular de levaduras tienen la capacidad de funcionar como probióticos (Ghosh et al., 2023). Estos compuestos mejoran la salud intestinal y el bienestar general de organismos acuícolas.
- Adaptación ambiental: los hongos pueden interactuar con bacterias en entornos pobres en nutrientes, lo que promueve interacciones beneficiosas entre reinos que mejoran el crecimiento y la supervivencia microbianos, lo que se puede aprovechar en los sistemas de acuicultura para mejorar la calidad del agua y el ciclo de nutrientes (Vélez et al., 2018).

- Flotabilidad y coloración del alimento: los hongos actúan como agentes de flotación, mejorando la flotabilidad de los alimentos acuícolas. Además, generan pigmentos que realzan la coloración de los filetes de pescado, haciéndolos más atractivos para los compradores (Onomu y Okuthe, 2024).

2.2 *Inmunidad y resistencia a las enfermedades*:

Los hongos y sus metabolitos secundarios ofrecen alternativas prometedoras a los antibióticos en la acuicultura al mejorar la resistencia a las enfermedades y la salud general de los animales acuáticos. Su aplicación como probióticos y agentes de biocontrol puede conducir a prácticas de acuicultura más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, ofreciendo una alternativa sostenible a los antibióticos y las vacunas, que pueden generar resistencia a los patógenos.

a) Función de los hongos y los metabolitos secundarios.

- *Potencial probiótico*: Los hongos, incluyendo levaduras y mohos, han sido identificados como potenciales probióticos en acuicultura. Contribuyen a la nutrición, inmunomodulación y prevención de enfermedades en peces e invertebrados en cultivo (Ghosh et al., 2023).
- *Propiedades antimicrobianas*: Los hongos marinos exhiben importantes actividades antibacterianas y antioxidantes, proporcionando soluciones antimicrobianas alternativas. Por ejemplo, los hongos asociados con las algas rojas han demostrado potencial contra los principales patógenos de la acuicultura, contribuyendo a la gestión sostenible de la salud del camarón (Kannan et al., 2024).
- *Metabolitos secundarios*: Los metabolitos secundarios producidos por hongos y otros microorganismos pueden inhibir patógenos. Por ejemplo, el *Streptomyces* sp. HNBCa1 marino produce metabolitos como reblastatina y geldanamicina, que exhiben actividad antifúngica de amplio espectro, lo que sugiere su potencial como agentes de biocontrol contra patógenos acuáticos (Xiong et al., 2024).

b) Aplicaciones en el control de enfermedades. *Inhibición de patógenos*: los metabolitos secundarios de los hongos pueden inhibir directamente los patógenos acuáticos. Por ejemplo, el compuesto orgánico volátil ácido 8-nonenoico, producido por el endófito bacteriano *Kocuria flava*, inhibe eficazmente el patógeno de la acuicultura *Saprolegnia parasitica*, mejorando la supervivencia de las larvas afectadas (Deutsch et al., 2023).
Beneficios ambientales: el uso de hongos y sus metabolitos en la acuicultura no solo ayuda a la resistencia a las enfermedades, sino que también contribuye a la mejora de la calidad del agua, lo que los convierte en una opción respetuosa con el medio ambiente (Ghosh et al., 2023).

c) Mejora del crecimiento e inmunidad. El uso de hongos y sus metabolitos secundarios en la acuicultura ha ganado atención como una alternativa sostenible para mejorar el crecimiento y la inmunidad en los animales acuáticos. Este enfoque es particularmente relevante en el contexto de las crecientes restricciones a los antibióticos y la necesidad de prácticas respetuosas con el medio ambiente.

Los hongos y sus metabolitos secundarios presentan una opción viable para mejorar el crecimiento y la inmunidad en los animales acuáticos, lo que respalda el avance hacia prácticas de acuicultura más sostenibles. Con el aumento de las regulaciones sobre el uso de antibióticos, los hongos y sus metabolitos ofrecen una alternativa prometedora para la acuicultura sostenible. Sin embargo, se necesita más investigación para comprender completamente sus mecanismos y optimizar su uso en diferentes entornos de acuicultura. Existe la necesidad de estudios más detallados sobre la composición química y el origen de los suplementos fúngicos para mejorar la reproducibilidad y comparabilidad de los hallazgos de la investigación (Ghosh et al., 2023; Reverter et al., 2021).

2.3 Biorremediación y biofloculación

La biorremediación y la biofloculación son procesos críticos en la acuicultura cuyo objetivo es mejorar la sostenibilidad y el respeto al medio ambiente. Los hongos y sus metabolitos secundarios han surgido como agentes prometedores en estos procesos, ofreciendo soluciones innovadoras para la gestión de residuos y el tratamiento del agua en los sistemas de acuicultura.

- **Función de los hongos en la biorremediación**. Los hongos son muy eficaces en la biorremediación debido a sus capacidades metabólicas para degradar moléculas orgánicas complejas. Pueden transformar, degradar, secuestrar o eliminar por completo compuestos no deseados de los ecosistemas, lo que los hace ideales para tratar contaminantes en entornos acuáticos. Se ha demostrado que los hongos descomponen pesticidas, productos farmacéuticos, plásticos y mitigan la contaminación por metales pesados, lo que destaca su versatilidad para abordar diversos contaminantes (Onomu y Okuthe, 2024; Vaksmaa et al., 2023).
- **Hongos en la biofloculación**. Se ha identificado a los hongos, como *Aspergillus oryzae*, como biofloculantes eficaces. Pueden eliminar microalgas y otras partículas del agua a través de mecanismos que involucran atracción electrostática y adsorción por proteínas extracelulares y polisacáridos. Este proceso es ecológico y evita la contaminación secundaria asociada con los floculantes químicos tradicionales (Nie et al., 2021; Nie et al., 2022). El uso de biofloculantes fúngicos es ventajoso debido a su naturaleza no tóxica y biodegradabilidad, lo que los hace adecuados para prácticas de acuicultura sostenible (Onomu y Okuthe, 2024; Nie et al., 2021).
- **Mecanismos y optimización**. La efectividad de los hongos en la biorremediación y la biofloculación está influenciada por varios factores, incluidos el pH, la dosis y las condiciones ambientales. Por ejemplo, las condiciones óptimas para la biofloculación con *Aspergillus oryzae* incluyen un rango de pH de 4.0 a 9.0 y dosis específicas y velocidades de mezcla para lograr una alta eficiencia de floculación (Nie et al., 2022). Estos parámetros son cruciales para maximizar la eficiencia de los hongos en aplicaciones de acuicultura.

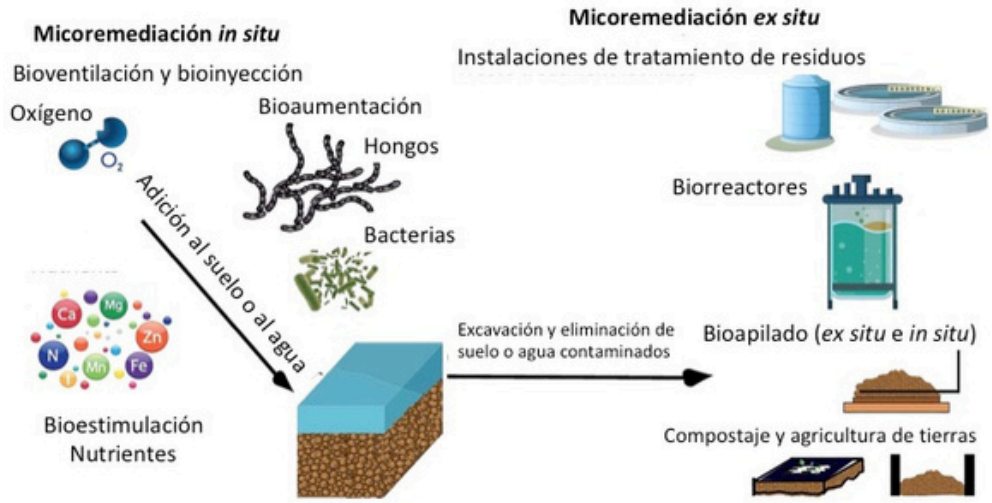


Figura 1. Estrategias de micorremediación in situ y ex situ más comúnmente aplicadas. Bioventilación y bioinyección: adición de oxígeno para promover la actividad de los microbios aeróbicos. Bioestimulación: adición de nutrientes para promover la remediación del contaminante por parte de los microbios. Bioaumentación: adición de microbios al lugar de la contaminación. Estrategias ex situ: biorreactores para el tratamiento de contaminantes en matriz acuosa. Compostaje: tratamiento de la matriz contaminada (a menudo, suelo) en un espacio confinado (a menudo también incluye tratamiento térmico). La agricultura terrestre se basa en la labranza regular del suelo, recolectado en un lecho designado. La bioapilación es un sistema que incluye sistemas de riego, aireación y recolección de lixiviados. En las biopilas, se controlan la humedad, el oxígeno, el pH y los nutrientes (Fuente: Vaksmaa et al. 2023).

3. Metabolitos Secundarios Fúngicos en Acuicultura

Los metabolitos secundarios fúngicos se han convertido en componentes clave en la acuicultura moderna, abordando desafíos críticos relacionados con la nutrición, la salud y la sostenibilidad ambiental. Mediante el análisis de estudios revisados por pares y datos de la industria, identificamos cuatro categorías principales de metabolitos fúngicos comercialmente viables: pigmentos, enzimas, micoproteínas y betaglucanos.

3.1. Pigmentos: Alternativas naturales para la coloración de especies acuáticas.

Carotenoides de Phaffia rhodozyma y Monascus purpureus. La demanda de pigmentantes naturales en la acuicultura ha impulsado la adopción de hongos productores de carotenoides como *Phaffia rhodozyma* (astaxantina) y Monascus purpureus (anka avin). La astaxantina, un carotenoide rojo-anaranjado, es fundamental para lograr la coloración de la carne que se espera en salmónidos y especies ornamentales como la carpa koi. Los productos comerciales derivados de *Phaffia* se integran en alimentos acuícolas en concentraciones de 50 a 100 mg/kg, lo que mejora la pigmentación y proporciona beneficios antioxidantes que mitigan el estrés oxidativo en los peces (Luján, 2025). Los pigmentos derivados del Monascus, que incluyen tonos amarillos, rojos y anaranjados, se utilizan en dosis similares y han demostrado mejorar el metabolismo lipídico en especies como Pagrus pagrus, reduciendo los lípidos totales entre un 15 % y un 20 %, a la vez que aumentan el contenido de ácidos

grasos omega-3 (Lujan, 2025). La transición a pigmentos fúngicos aborda las limitaciones de las alternativas sintéticas, que presentan riesgos ambientales y potencial carcinogenicidad (Luján, 2025). Los datos técnicos de PEKILO®Aqua de Enifer destacan los efectos sinérgicos de la combinación de pigmentos con betaglucanos, eliminando la necesidad de aditivos inmunoestimulantes por separado (Enifer, 2025).

3.2 Enzimas: Mejora de la disponibilidad de nutrientes y la sostenibilidad ambiental.

Fitasa de Aspergillus spp. Las enzimas fitasas producidas por *Aspergillus niger* y especies relacionadas se utilizan ampliamente para hidrolizar el fitato en alimentos acuícolas de origen vegetal, liberando fósforo y minerales ligados. Los productos comerciales de fitasa, como los comercializados por Novozymes y DSM, mejora la retención de fósforo en los peces entre un 40 % y un 60 % en comparación con los suplementos inorgánicos (Onomu y Okuthe, 2024; Burgin, 2016). Un estudio con bagres de canal demostró que la fitasa fúngica aumentó el contenido de cenizas óseas en un 22 % y redujo la contaminación hídrica por fósforo en un 35 % (Onomu y Okuthe, 2024). La termoestabilidad es una ventaja clave de la fitasa fúngica, ya que las variantes derivadas de *Aspergillus* conservan entre un 80 % y un 90 % de actividad tras la exposición a 85 °C durante 30 segundos, lo que las hace aptas para procesos de peletización (Burgin, 2016).

3.3 Micoproteínas: Fuentes de Proteína Sostenibles para Alimentos Acuícolas

PEKILO®Aqua de Enifer. PEKILO®Aqua, una micoproteína producida por *Paecilomyces variotii*, representa un gran avance en ingredientes sostenibles para alimentos acuícolas. Con un 65 % de proteína cruda y un 15 % de betaglucanos, sirve como sustituto directo de la harina de pescado y la harina de soja (Enifer, 2025). Estudios con salmón del Atlántico revelaron una digestibilidad proteica del 85 %, comparable a la de la harina de pescado, a la vez que reduce la huella de carbono en un 70 % gracias a su producción a partir de subproductos forestales (Enifer, 2025). El contenido de betaglucanos del producto (15 %) mejora la inmunidad innata, como se demostró en estudios con salmones juveniles, donde las tasas de supervivencia aumentaron un 12 % durante brotes de Vibrio (Enifer, 2025).

3.4 Betaglucanos: Inmunoestimulantes a partir de biomasa fúngica

Derivados de Saccharomyces cerevisiae y Aureobasidium pullulans. Los betaglucanos extraídos de las paredes celulares fúngicas se incorporan a los alimentos acuícolas en concentraciones del 0,1 al 0,3 % para mejorar la resistencia a enfermedades. Por ejemplo, los betaglucanos derivados de S. cerevisiae aumentaron la actividad de la lisozima en la tilapia del Nilo en un 45 %, mejorando así la supervivencia contra infecciones por Aeromonas hydrophila (Onomu y Okuthe, 2024). Las variantes de Aureobasidium pullulans, que producen 1,3/1,6-betaglucanos, son comercializadas por empresas como Leiber GmbH y han demostrado su eficacia en la reducción de la tasa de conversión alimenticia (ICA) entre un 8 y un 10 % en cultivos de camarones (Onomu y Okuthe, 2024).

doi.org/10.5281/zenodo.15869917

4. Regulaciones de Metabolitos Secundarios y Suplementos en Acuicultura

Las regulaciones sobre metabolitos secundarios y suplementos nutricionales en acuicultura varían entre la UE, EE.UU. y México, pero todas comparten un enfoque en la seguridad y eficacia (Tabla 2). Es fundamental que los productores cumplan con estas normativas para garantizar la salud animal y la inocuidad alimentaria.

La Unión Europea (UE) tiene un marco regulatorio riguroso para el uso de metabolitos secundarios, probióticos, prebióticos, inmunobióticos, péptidos antimicrobianos, vitaminas y pigmentos en acuicultura. La legislación clave incluye el Reglamento (CE) No 1831/2003 (European Parliament, 2003) sobre aditivos para piensos, que establece criterios para la autorización y uso de aditivos que mejoren la salud y el bienestar de los animales. Los probióticos y prebióticos deben demostrar su eficacia y seguridad antes de obtener la aprobación. Además, los productos deben cumplir con los estándares de calidad establecidos por la Agencia Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, 2025), que evalúa la seguridad de los microbios vivos y otros componentes.

En EE.UU., la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, 2024) regula los suple - mentos utilizados en acuicultura a través del enfoque del "nuevo alimento". Los probióticos y prebióticos son considerados aditivos alimentarios y deben ser aprobados antes de su comercialización. La FDA exige datos sobre la seguridad y eficacia, además de cumplir con las Buenas Prácticas de Manufactura (GMP).

Los péptidos antimicrobianos y otros metabolitos deben ser evaluados en términos de su impacto en la salud pública y animal, asegurando que no haya residuos perjudiciales en los productos acuáticos.

En México, las regulaciones están a cargo de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) y el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). Estos organismos supervisan el uso de probióticos, prebióticos e inmunobióticos, exigiendo estudios que demuestren su eficacia y seguridad. Las normativas mexicanas también requieren la evaluación del impacto ambiental asociado con el uso de estos productos en la acuicultura. Aparte, se siguen lineamientos internacionales para asegurar que los productos cumplan con estándares globales (AAFCO, 2023; FAO/WHO, 2025; FAO, 2016).

Tabla 2. Ejemplos de sustancias aprobadas derivadas de hongos y levaduras.

Sustancia	Aplicación	Estado regulatorio
Saccharomyces cerevisiae (levadura)	Probiotico	Listado como QPS por la EFSA (seguro para uso en alimentos acuícolas).
Astaxanthina (levadura)	Pigmento (p. ej., color salmón). Aprobado según el	Reglamento (UE) 1831/2003 (se aplican criterios de pureza).
β-Glucanos (hongos)	Immunobiotico	Evaluado como aditivos zootécnicos (se requiere aprobación de la EFSA).
Quitosano (fúngico).	Antimicrobiano (similar a un prebiótico).	Regulado como aditivo alimentario o medicamento veterinario según las reivindicaciones.

5. Desafíos y direcciones futuras

La investigación futura debe priorizar las evaluaciones de impacto ecológico y los análisis de costo-efectividad para garantizar un acceso equitativo en los diversos sistemas acuícolas. Los hongos y sus metabolitos secundarios tienen un potencial significativo para mejorar la sostenibilidad y la productividad de la acuicultura. Sin embargo, se deben abordar desafíos como: *a). Dosis y duración de la fermentación*: la efectividad de los hongos para reducir las fracciones de fibra y mejorar la disponibilidad de nutrientes está influenciada por la duración y la dosis de la fermentación, que pueden variar para diferentes ingredientes del alimento. Esta variabilidad hace que sea un desafío para los acuicultores aplicar hongos de manera efectiva sin pautas precisas (Onomu y Okuthe, 2024); *b). Colonización probiótica*: si bien los hongos y las actinobacterias tienen potencial como probióticos, su colonización y potencial probiótico en el entorno de cultivo o dentro de los tractos gastrointestinales de los peces ha recibido menos atención en comparación con los probióticos más convencionales, como los bacilos y las bacterias del ácido láctico (Ghosh et al., 2023); *c). Barreras regulatorias y económicas*: el desarrollo y la aplicación de productos a base de hongos en la acuicultura pueden enfrentar obstáculos regulatorios y restricciones económicas, particularmente en la ampliación de la producción y la garantía de la rentabilidad (Ghosh et al., 2023).

Las investigaciones futuras deberían centrarse en: a). Investigación sobre condiciones óptimas: se necesita más investigación para determinar la dosis más efectiva y la duración de la fermentación para cada ingrediente del alimento para maximizar los beneficios de los hongos en la acuicultura (Onomu y Okuthe, 2024); b). Exploración de los mecanismos probióticos: es necesario explorar y comprender los mecanismos probióticos de los hongos y las actinobacterias, incluidas sus funciones en la nutrición, la inmunomodulación y la prevención de enfermedades (Ghosh et al., 2023); c). Elaboración de postbióticos derivados de hongos, que se clasifican como postbióticos fúngicos, muestran un gran potencial para fortalecer la inmunidad innata y aumentar la resistencia a enfermedades en los peces e invertebrados en cultivo. Esto indica una oportunidad valiosa para su desarrollo (Ghosh et al., 2023).

6. Conclusiones

La comercialización de probióticos, prebióticos e inmunobióticos a base de hongos y levaduras marca un cambio de paradigma hacia la acuicultura sostenible. Productos como Actisaf® Sc 47, Bio-Mos® y MacroGard® ejemplifican la sinergia entre la innovación científica y la aplicación industrial, ofreciendo soluciones escalables a los desafíos globales de la seguridad alimentaria. Los hongos y sus compuestos bioactivos presentan soluciones innovadoras para la acuicultura sostenible, ya que mejoran el crecimiento, la inmunidad y la resistencia a las enfermedades, y al mismo tiempo contribuyen a la biorremediación y a una mayor eficiencia alimentaria. Sirven como inmunoestimulantes, probióticos y agentes antimicrobianos eficaces, proporcionando alternativas ecológicas a los métodos tradicionales de gestión de enfermedades. Este enfoque no solo mejora la salud y la productividad de las especies de acuicultura,

doi.org/10.5281/zenodo.15869917

sino que también respalda la sostenibilidad ambiental. Los hongos representan una alternativa ecológica a los floculantes químicos tradicionales, mejoran la calidad de los alimentos y mejoran la sostenibilidad general de los sistemas de acuicultura.

En conclusión, la aplicación de hongos y sus metabolitos secundarios ofrece oportunidades prometedoras para la acuicultura sostenible. Al mejorar el crecimiento, la inmunidad y la resistencia a las enfermedades, y mejorar la calidad de los alimentos y la gestión del agua, los hongos pueden contribuir significativamente a la sostenibilidad y la productividad de los sistemas de acuicultura.

7. Literatura citada

- **Abdel-Tawwab** M., Adeshina I., Issa Z.A. 2020. Antioxidants and immune responses, resistance to *Aspergillus flavus* infection, and growth performance of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, fed diets supplemented with yeast, *Saccharomyces cerevisiae*. Animal Feed Sci. Technol. 263: 114484. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114484
- **Burgin** R. 2016. Is the potential of enzymes in aquafeed realised? https://www.allaboutfeed.net/animal-feed/feed-additives/is-the-potential-of-enzymes-in-aquafeed-realised/
- **Chen** H.M., Lu H.M., Niu X.T., Wang G.Q., Zhang D.M. 2015. Enhancement of secondary metabolites from *Bacillus Licheniformis* XY-52 on immune response and expression of some immune-related genes in common carp, *Cyprinus carpio*. Fish Shellfish Immunol. 45: 124-131. http://dx.doi.org/10.1016/j.fsi.2015.02.019
- **Deutsch** Y., Samara M., Nasser A., Berman-Frank I., Ezra D. 2023. *Kocuria flava*, a Bacterial Endophyte of the Marine Macroalga *Bryopsis plumosa*, Emits 8-Nonenoic Acid Which Inhibits the Aquaculture Pathogen Saprolegnia parasitica. Mar. Drugs 21: 476. https://doi.org/10.3390/md21090476
- **Enifer**. 2025. PekiloAqua. https://enifer.com/products/pekilo-aqua
- **Ghosh** K., Harikrishnan R., Mukhopadhyay A., Ringø E. 2023. Fungi and Actinobacteria: alternative probiotics for sustainable aquaculture. Fishes 8: 575. https://doi.org/10.3390/fishes8120575
- **Impextraco**. 2025. Moldstop. Mold inhibitor. https://www.impextraco.com/en/products/specialty-feed-additives/moldstop
- **Kannan** J., Pang K., Ho Y., Hsu P., Chen L. 2024. A Comparison of the Antioxidant Potential and Metabolite Analysis of Marine Fungi Associated with the Red Algae *Pterocladiella capillacea* from Northern Taiwan. Antioxidants, 13. https://doi.org/10.3390/antiox13030336.
- **Karimi** S., Soofiani N.M., Lundh T., Mahboubi A., Kiessling A., Taherzadeh M.J. 2019. Evaluation of filamentous fungal biomass cultivated on vinasse as an alternative nutrient source of fish feed: protein, lipid, and mineral composition. Fermentation 5(99): 1-17. https://doi:10.3390/fermentation5040099

- **Lujan** M. 2025. The potential of pigmented fungi in aquafeed. Aquahoy. https://aquahoy.com/potential-of-pigmented-fungi-in-aquafeed/
- **Nie** Y., Wang Z., Wang W., Zhou Z., Kong Y., Ma j. 2022. Bio-flocculation of *Microcystis Aeruginosa* by using fungal pellets of *Aspergillus Oryzae*: Performance and mechanism. J. Hazardous Materials. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4105017
- **Nie** Y., Wang Z., Zhang R., Ma J., Zhang H., Li S., Li J. 2021. *Aspergillus oryzae*, a novel eco-friendly fungal bioflocculant for turbid drinking water treatment. Separation Purif. Technol. 279: (2021) 119669. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119669
- **Noor-Ula** H., Haokun L., Junyana J., Xiaoming Z., Dong H., Yunxia Y., Shouqi X. 2020. Dietary supplementation of *Geotrichum candidum* improves growth, gut microbiota, immune-related gene expression and disease resistance in gibel carp CAS III (*Carassius auratus gibelio*). Fish Shellfish Immunol 99: 144-153. doi: https://doi.org/10.1016/j.fsi.2020.02.001.
- **Onomu** A.J., Okuthe G.E., 2024. The application of fungi and their secondary metabolites in Aquaculture. J. Fungi 10: 711. https://doi.org/10.3390/jof10100711
- **Reverter** M., Tapissier-Bontemps N., Sarter S., Sasal P., Caruso D. 2021. Moving towards more sustainable aquaculture practices: a meta-analysis on the potential of plant-enriched diets to improve fish growth, immunity and disease resistance. Rev. Aquaculture 13: 537–555. https://doi: 10.1111/raq.12485
- **Vaksmaa** A., Guerrero-Cruz S., Ghosh P., Zeghal E., Hernando-Morales V., Niemann H. 2023. Role of fungi in bioremediation of emerging pollutants. Front. Mar. Sci. 10:1070905. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1070905
- **Velez** P., Espinosa-Asuar L., Figueroa M., Gasca-Pineda J., Aguirre-von-Wobeser E., Eguiarte L.E., Hernandez-Monroy A., Souza V. 2018. Nutrient dependent cross-kingdom interactions: fungi and bacteria from an oligotrophic desert oasis. Front. Microbiol. 9:1755. https://doi: 10.3389/fmicb.2018.01755
- **Xiong** Z., Xia T., Wu W., Wang R., Qi M., Zhang S., Li J., Yang Y., Zheng D., Lin S., Guo Z. 2024. Critical secondary metabolites confer the broad-spectrum pathogenic fungi resistance property of a marine-originating *Streptomyces* sp. HNBCa1. J. Agri. Food Chem. 72(23): 13164–13174. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c02805

Sobre el autor



Dr. Felipe Ascencio. Investigador Titular D y profesor en el CIBNOR, SNI III. Responsable del Laboratorio de Patogénesis Microbiana. Loop: 264286; Scopus: 57247070500; ORCI: 0000-0003-3515-8708.

Cita:
Ascencio, F. (2025). Innovaciones en Acuicultura: Hongos y sus Compuestos Bioactivos. Biotecnológica Magazine, 3(3), 53-63. https://doi.org/10.5281/zenodo.15869917

Los radicales libres y ¿cómo disminuir sus efectos?

Jorge Luis Hernández Vicencio, Yazmín Hernández Díaz*, Arath de la Torre Moreno
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Av. Universidad s/n, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Vhsa., Centro, Tabasco, México. C.P. 86040.
*Autor de correspondencia: yazmin.hdez.diaz@gmail.com

Tema: Este artículo trata sobre el efecto negativo de los radicales libres, lo cual es fundamental para concienciar sobre su impacto en el envejecimiento celular y el desarrollo de enfermedades crónicas. Informar al público permite promover hábitos saludables y el consumo de antioxidantes naturales. Además, fomenta la investigación y el desarrollo de estrategias preventivas.

1. Introducción

Si observas a tu alrededor podrás distinguir a las personas que realizan actividades al aire libre, comen saludable y se ven más jóvenes que otras personas de su misma edad, pero ¿por qué sucede esto?, existe un proceso químico llamado “oxidación” que sucede día a día en cada célula del cuerpo y que produce un exceso de radicales libres. Los radicales libres son moléculas inestables (Fig. 1) que se originan durante el metabolismo normal de las células y producen efectos negativos a la salud, por ejemplo, acelerando el envejecimiento.

2. Los radicales libres

La oxidación es fundamental para la vida, pues ayuda a las células a obtener energía. Este proceso ocurre cuando una molécula pierde uno o más electrones y siempre ocurre junto a otro que se denomina “reducción”, que es lo opuesto; en vez de perder electrones, la molécula acepta o gana los electrones. Una de las cosas malas del proceso de oxidación es que da origen a la aparición de Especies Reactivas de Oxígeno (ERO) que son moléculas muy inestables que contienen oxígeno y que pueden reaccionar con otras moléculas de la célula.

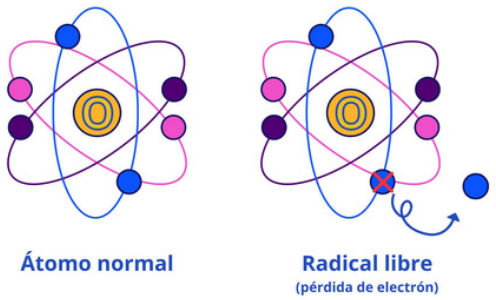


Figura 1. Los radicales libres son moléculas que contienen oxígeno y que tienen un electrón desemparejado.

Estas moléculas pueden provocar daños a nivel de lípidos, proteínas y en nuestro ADN, lo que lleva a que diversos procesos celulares y metabólicos sean alterados. Los radicales libres son un tipo de ERO, pero no todas las ERO son radicales libres. En realidad, no podemos hacer desaparecer a las ERO debido a que forman parte de procesos fundamentales y naturales en nuestro cuerpo (Aramouni et al., 2023).

Todo lo que consumimos en exceso o dejamos de consumir llega a convertirse en algo dañino con el tiempo, esto también ocurre con los radicales libres, debido a que en cantidades normales nos ayudan, pero su producción y acumulación descontrolada nos puede perjudi-

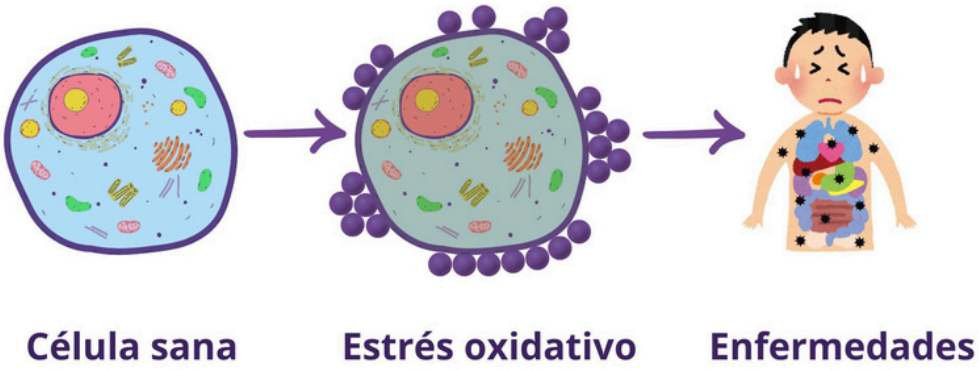


Figura 2. La producción y acumulación descontrolada de radicales libres puede perjudicar la salud.

perjudicar (Fig. 2). Existen una variedad de situaciones en las que estamos expuestos a los radicales libres, situaciones que aceleran a nuestras células para que alcancen un estado de "estrés oxidativo" y que originan problemas de salud a largo plazo.

Hábitos como fumar, la exposición al sol por demasiado tiempo, tener un consumo excesivo de alcohol, consumir descontroladamente ciertos tipos de fármacos y el consumir alimentos ultra procesados, como lo son las hamburguesas, aceleran el estrés oxidativo en nuestras células. La edad es un factor importante para el estrés oxidativo. Los radicales libres aumentan conforme vamos envejeciendo, esto se debe a que la eficacia de los sistemas que trabajan para contrarrestar el daño celular ocasionado por los radicales libres disminuye, lo que lleva a la acumulación de daños en los sistemas naturales que tiene el cuerpo.

3. Efectos negativos a la salud

El ambiente y nuestros hábitos aceleran el estrés oxidativo. Los daños y efectos del estrés oxidativo se notan desde el nivel molecular hasta el físico. Hay una serie de procesos patológicos que se pueden relacionar con el exceso de radicales libres, o al menos estarían implicados en alguna de las fases de estos procesos o en la secuencia bioquímica del organismo.

La aparición de la enfermedad de Alzheimer implica un proceso llamado peroxidación lipídica, donde los radicales libres dañan los lípidos (grasas) que forman parte de la barrera que tienen todas las células de nuestro cuerpo (membrana celular). Estas membranas son cruciales porque protegen a nuestras células del exterior, como tu piel protege tus órganos, y controlan lo que entra y sale de ellas. Este daño ocurre especialmente en unas grasas llamadas ácidos grasos poliinsaturados, un tipo de grasa muy común en el cerebro y que es esencial para que nuestras neuronas puedan comunicarse entre ellas (Teleanu et al., 2022).

Cuando los radicales libres atacan estas grasas, se crean lípidos hidroperóxidos y comienza una reacción en cadena que destruye la estructura de la membrana celular, afectando la comunicación y dando lugar a la muerte de la célula. En pacientes con esta patología, se han encontrado grandes cantidades de radicales libres y lípidos hidroperóxidos, lo que sugiere que la peroxidación lipídica contribuye al

desarrollo de esta enfermedad acelerando el daño en el cerebro.

La ateroesclerosis es otra enfermedad en la que las arterias de nuestro cuerpo se tapan debido a la acumulación de colesterol y de muchas otras sustancias que se encuentran en nuestra sangre. Todo comienza con la acumulación del colesterol "malo" denominado lipoproteínas de baja densidad (LDL) que se producen en el hígado y terminan acumulándose en las paredes de las arterias y forman una especie de bulto llamado placa arteriosclerótica, dañando las arterias y provocando inflamación en estas. Cuando existe un exceso de radicales libres, estas moléculas LDL se oxidan más rápido y será mucho más fácil crear bultos en las arterias originando la ateroesclerosis.

El ADN es como un manual de instrucciones que tienen todas las células en su interior, está formado por cuatro bases nitrogenadas que son las letras de este manual. Dependiendo del orden en el que estén, tendrán un significado único y diferente para que la célula produzca las proteínas que necesita para su total funcionamiento. Sin embargo, el ADN es un blanco fácil para el ataque de las ERO. Estas moléculas pueden provocar un error en el manual de instrucciones (el ADN). Estos errores o cambios los conocemos como mutaciones.

Las mutaciones pueden originar proteínas que funcionan mal o simplemente no funcionan. El daño al ADN es uno de los primeros pasos hacia el desarrollo del cáncer (carcinogénesis). Aunque nuestro cuerpo tiene sus propios sistemas de reparación para corregir ese daño, algunas lesiones que ocasiona la oxidación escapan de la reparación o el mantenimiento que hace la célula cuando se divide y se van acumulando con el tiempo, especialmente con la edad.

4. ¿Y ahora quién podrá defendernos?

El ser humano dispone de superhéroes llamados antioxidantes que son capaces de disminuir o prevenir la formación de los radicales libres. ¿Cómo lo hacen? Los antioxidantes tienen la capacidad de regalar los electrones a los radicales libres, quitándoles su fuerza destructiva. ¿Quién diría que dar un regalo es mejor que recibirlo? Lo maravilloso de estos superhéroes es que son tan poderosos que no se necesita un ejército enorme para combatir a los radicales libres.

Los antioxidantes los podemos sintetizar dentro del cuerpo o ingerirlos mediante la dieta. Podemos dividirlos en dos grupos: los endógenos (sintetizados) y exógenos (ingeridos). Dentro de los endógenos encontramos a las enzimas Superóxido Dismutasa (SOD) que se encargan de la conversión de superóxido en peróxido de hidrógeno. SOD1 actúa en el cuerpo de la célula (citosol) y en el espacio entre las paredes de nuestras fábricas de energía (mitocondria), SOD2 en la matriz de la mitocondria y SOD3 en el espacio que está fuera de la célula; actúan como jefes de seguridad cuidando de que no haya delincuentes (radicales libres) intentando dañar su lugar de trabajo (la célula). Otra enzima muy reconocida es la catalasa, que descompone el peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno, la podemos encontrar principalmente en el hígado y en los riñones.

Del lado de los antioxidantes exógenos podemos encontrar todos los que ingerimos o ponemos sobre nuestra piel, como las verduras, las frutas, los suplementos o distintas sustancias ricas en antioxidantes. Estos compuestos son numerosos y con una variedad muy amplia. En este grupo podemos encontrar compuestos como los flavonoides, flavonoles, flavonas, carotenoides, polifenoles y distintas vitaminas.

Uno de los más interesantes es el polifenol, este compuesto orgánico lo podemos encontrar en las frutas y verduras, en el cereal, el café y en el té, y es un excelente antioxidante. De aquí proviene una sustancia muy interesante llamada resveratrol que ayuda a las plantas a defenderse de infecciones, estrés, lesiones y de la luz del sol. Se ha estudiado ampliamente su uso para la prevención del cáncer, enfermedades cardiacas y como molécula antienvejecimiento. También se puede encontrar en una bebida muy famosa, el vino. El vino es un excelente antioxidante, antiinflamatorio, antiaterogénico y ayuda a promover la dilatación de los vasos sanguíneos (Bocsan et al., 2022).

Del lado de las vitaminas tenemos a la B3 (niacinamida). Se encuentra naturalmente en el cuerpo y en algunos alimentos como el pescado, carnes y cereales. Ayuda a proteger la piel de los radicales libres y los agentes externos. El trabajo de la niacinamida es mantener cargadas de electrones a las enzimas para que así puedan regalar electrones a los radicales libres y quitarles su poder destructivo. La vitamina B3 mejora la elasticidad de la piel, reduce las arrugas, manchas y las líneas de expresión de la cara, por lo que es muy fácil encontrarla en productos de cuidado de la piel como serums y cremas.

5.Conclusión

El estrés oxidativo afecta desde nuestras células hasta los órganos del cuerpo. Si no controlamos la producción de radicales libres y entramos en un estado de estrés, podemos desencadenar daños graves en nuestro organismo. La alimentación y la actividad física juegan un papel fundamental. Consumir alimentos ricos en antioxidantes ayuda a complementar las defensas naturales de nuestro cuerpo. Cuidar de nuestras células es cuidar de nuestra vida, y aunque los radicales libres son inevitables, nosotros tenemos el superpoder de minimizar sus efectos.

6. Referencias

- Aramouni, K., Assaf, R., Shaito, A., Fardoun, M., Al-Asmakh, M., Sahebkar, A., & Eid, A. H. (2023). Biochemical and cellular basis of oxidative stress: Implications for disease onset. J Cell Physiol, 238(9), 1951-1963. doi:10.1002/jcp.31071
- Bocsan, I. C., Măgureanu, D. C., Pop, R. M., Levai, A. M., Macovei Ș, O., Pătrașca, I. M., Buzoianu, A. D. (2022). Antioxidant and Anti-Inflammatory Actions of Polyphenols from Red and White Grape Pomace in Ischemic Heart Diseases. Biomedicines, 10(10). doi:10.3390/biomedicines10102337
- Teleanu, D. M., Niculescu, A. G., Lungu, II, Radu, C. I., Vladâcenco, O., Roza, E., Teleanu, R. I. (2022). An Overview of Oxidative Stress, Neuroinflammation, and Neurodegenerative Diseases. Int J Mol Sci, 23(11). doi:10.3390/ijms23115938

Sobre los autores

Jorge Luis Hernández Vicencio. Doctorado en Salud Pública. Especialista en temas de salud mental.

Yazmín Hernández Díaz. Doctorado en Ciencias Biomédicas. Investigadora nacional nivel 2. Sus líneas de investigación abarcan la identificación de factores genéticos y ambientales implicados en la aparición de enfermedades.

Arath de la Torre Moreno. Licenciado en Genómica. Sus intereses se enfocan en el área de biomedicina.

Cita:
Hernández-Vicencio, J. L., Hernández Díaz, Y., & de la Torre Moreno, A. (2025). Los radicales libres y ¿cómo disminuir sus efectos?. Biotecnológica Magazine, 3(3), 64-68. https://doi.org/10.5281/zenodo.15869933

Día Mundial de los Océanos: Las 10 nuevas especies marinas más destacadas del 2024.

Dra. Norma Y. Hernández Saavedra
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Tema: A propósito del Día Mundial de los Océanos, que se celebró el pasado 8 de junio, y que tiene como objetivo informar sobre el impacto de los humanos en el océano para unir a la población en un proyecto para la gestión sostenible de nuestros mares. El número de especies que podría encontrarse en los mares varía entre 150 mil y 10 millones, según los autores que hagan la estimación, aunque las cifras más moderadas y razonables contemplan la posibilidad de que se trate de un millón. De todas estas especies solamente se conocen alrededor de 250 mil, lo que significa que se desconoce cerca del 70% de las especies marinas. Algunos autores han estimado que, en un solo muestreo, en un ambiente tropical de playa, la posibilidad de encontrar una nueva especie es del 80 por ciento. Cada año, el Registro Mundial de Especies Marinas (WoRMS, por sus siglas en inglés) publica su lista de las 10 especies marinas más destacadas el día de Agradecimiento al Taxónomo (19 de marzo), como una celebración a los fascinantes descubrimientos de nuevas especies marinas. La lista de 2024 destaca la increíble diversidad de vida que se encuentra bajo las olas y resalta la importancia de los taxónomos en el mundo y su gran papel en la catalogación y comprensión de la biodiversidad marina. No hay que perder de foco que descubrimientos como estos ponen de manifiesto lo poco que aún sabemos sobre nuestros océanos y que el descubrimiento de nuevas especies marinas es esencial para la conservación de la biodiversidad, el avance científico, la sostenibilidad del planeta y son una fuente inagotable de nuevas moléculas con uso potencial en biotecnología.

1. Introducción

El océano cubre más del 70% de la superficie del planeta, es fuente de vida y sustento de la humanidad y de todos los demás organismos de la tierra (Castillo, 2013). El océano produce al menos el 50% del oxígeno del planeta, alberga la mayor parte de la biodiversidad de la tierra y es la principal fuente de proteínas para más de 1000 millones de personas en todo el mundo. Además, es clave para nuestra economía, ya que se estima que, para 2030, habrá casi 40 millones de trabajadores en todo el sector relacionado con los océanos (ONU, 2025).

Con el 90% de las grandes especies marítimas de peces mermadas y el 50% de los arrecifes de coral destruidos, estamos extrayendo más del océano de lo que se puede reponer. Debemos trabajar juntos para crear un nuevo equilibrio en el que no agotemos todo lo que este nos ofrece, sino que restauremos su vitalidad y le devolvamos una nueva vida. Sin embargo, a pesar de todos sus beneficios, necesita más apoyo que nunca (ONU, 2025).

doi.org/10.5281/zenodo.15869947

El Top 10 de cada año (desde el 2007; UNESCO, 2024) es compilado por la red global de editores y usuarios de WoRMS, quienes nominan y votan por sus especies marinas favoritas descritas el año anterior. Las nominaciones están abiertas a especies descritas entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de cada año y deben provenir del medio marino (se incluyen fósiles). Al final, la lista refleja la gran diversidad de la vida marina, que abarca animales de diversos grupos, como peces, crustáceos, moluscos, corales, esponjas, medusas y gusanos. Esta lista de las diez primeras es sólo una pequeña muestra de las casi 2.000 nuevas y fascinantes especies marinas que se descubren cada año; en 2024 se describieron casi 2.000 especies marinas que se añadieron al WoRMS, incluidas unas 610 especies fósiles (WoRMS, 2025).

Las especies seleccionadas no solo resaltan el vasto y a menudo inexplorado mundo marino, sino que también llaman la atención sobre los desafíos que enfrentan nuestros océanos. Muchas de las especies nominadas revelan problemas críticos como el impacto del cambio climático, las especies invasoras y los ecosistemas de aguas profundas afectados por la actividad humana. La lista de las Diez Mejores de WoRMS es más que una simple celebración de las especies recién descubiertas: es un recordatorio del trabajo continuo de los taxónomos de todo el mundo (WoRMS, 2025).

2. Exploración sistemática de los océanos y descubrimiento de nuevas especies marinas desconocidas

2.1. Importancia

El descubrimiento de nuevas especies marinas desconocidas es vital para comprender la biodiversidad del planeta y desarrollar estrategias de conservación efectivas. El océano, con una gran cantidad de especies aún por descubrir, ofrece un gran potencial para avances científicos, sociales y económicos. Entre los beneficios del descubrimiento de nuevas especies marinas podemos mencionar:

1. *Avance en el conocimiento de la biodiversidad*; cada nueva especie descubierta amplía nuestro entendimiento de la complejidad y diversidad de la vida marina y da pauta para hipotetizar algunos procesos evolutivos complejos, particularmente en ambientes extremos, lo que es fundamental para la conservación y los descubrimientos biotecnológicos.
2. *Desarrollo de estrategias de conservación*; el conocimiento de nuevas especies y sus ecosistemas permite a los científicos desarrollar estrategias más efectivas para protegerlos.
3. *Identificación de recursos marinos*; el descubrimiento de nuevas especies puede revelar nuevas fuentes de energía renovable o recursos naturales, así como nuevas fuentes de medicamentos o alimentos. Algunas especies marinas tienen propiedades únicas que pueden ser utilizadas para desarrollar nuevos medicamentos, materiales y tecnologías (biotecnología azul).
4. *Comprender la dinámica de los ecosistemas*; las nuevas especies pueden arrojar luz sobre las relaciones entre especies y los roles que desempeña cada una en los ecosistemas.
5. *Comprensión del cambio climático*; la exploración oceánica es fundamental para comprender cómo los océanos absorben carbono y cómo contribuyen a la regulación del clima global.

6. *Impacto en la economía*; la investigación marina puede impulsar la economía, desde la industria pesquera sostenible hasta el desarrollo de tecnologías de exploración oceánica.
7. *Educación y conciencia*; el descubrimiento de nuevas especies puede despertar el interés por el océano y fomentar la conservación marina.

Para estimular la ambiciosa agenda mundial de las ciencias oceánicas del Decenio del Océano, se creó la Alianza Decenio del Océano (2021-2030) con el fin de impulsar una red de socios eminentes que puedan predicar con el ejemplo para catalizar el apoyo al Decenio mediante la movilización de recursos específicos y la creación de redes. La Alianza Decenio del Océano es una plataforma mundial que ocupa un nicho de alto perfil y único, centrado en la acción y el desarrollo compartido de soluciones (UNESCO, 2025). Su mandato no tiene comparación y su objetivo es apoyar la movilización de recursos para las ciencias oceánicas en todas sus manifestaciones a fin de alcanzar la visión del Decenio del Océano y contribuir así a la Agenda 2030 de la ONU (ONU, 2015). Dentro de los socios de la alianza destaca la Fundación Nippon-Nekton, que a través de su programa Censo Oceánico (Nippon Foundation Nekton Ocean Census), ha permitido el descubrimiento de 866 nuevas especies marinas, entre las que se incluyen un tiburón guitarra, un molusco de aguas profundas con potencial para el tratamiento del cáncer y el primer octocoral hallado en las Maldivas (Fig. 1) (Hutchins, 2025).



Figura 1. Nuevas especies encontradas bajo el auspicio de la Nippon Foundation Nekton Ocean Census. Ariba, octocoral, descubierto en las Maldivas, es una de las cinco únicas especies conocidas del género y la primera registrada en las Maldivas. Abajo, Turridrupa magnifica, un gasterópodo marino que se encuentra entre 200 y 500 m de profundidad frente a Nueva Caledonia y Vanuatu, produce péptidos con posibles aplicaciones en el alivio del dolor y el tratamiento del cáncer (Tomado de Hutchins, 2025).

Como los demás socios de la alianza, el programa Censo Oceánico de la Fundación Nippon-Nekton busca cambiar la forma en que los científicos identifican nuevas especies marinas acelerando el proceso. Los métodos tradicionales pueden tardar hasta 14 años, pero este esfuerzo colaborativo internacional de 800 científicos de más de 400 instituciones está cambiando el enfoque.

Hay que considerar que muchas especies se extinguen antes de ser documentadas, al acelerar la identificación, los científicos pueden proteger mejor a estas especies. Está claro que algunos de estos descubrimientos podrían beneficiar directamente la salud.

3. El TOP 10 2024

3.1. *Bathydevius caudactylus*

Este organismo es un gasterópodo nudibranquio (pariente de los caracoles y las babosas de mar), que se encontró en Monterey Canyon (California, EU) a media agua a 1900 m de profundidad. El nombre de la especie *B. caudactylus* sp. nov. se refiere a las proyecciones en forma de dedos que recubren el margen posterior de la cola (Fig. 2).

B. caudactylus (Robison y Haddock, 2024) fue capturado fotográficamente, pero no estudiado de forma concluyente hasta ahora; este gasterópodo (pariente de los caracoles) había sido visto durante mucho tiempo en estudios de video y cámara en aguas medias del Océano Pacífico oriental, y durante años fue conocido simplemente como el "molusco misterioso". *B. caudactylus* posee un cuerpo blanco translúcido coronado por una gran capucha oral, un estómago y una glándula digestiva de color rojo anaranjado, y una cola bordeada por una docena de proyecciones digitiformes que le otorgan su epíteto específico. El cuerpo de este misterioso molusco emite bioluminiscencia azul.

Robison y Haddock (2024) llevaron a cabo los estudios anatómicos y genéticos que finalmente resolvieron el misterio, pero su trabajo ha planteado nuevas preguntas intrigantes. B. caudactylus es un nudibranquio, un orden de gasterópodos cuyos miembros son comunes en aguas poco profundas y en

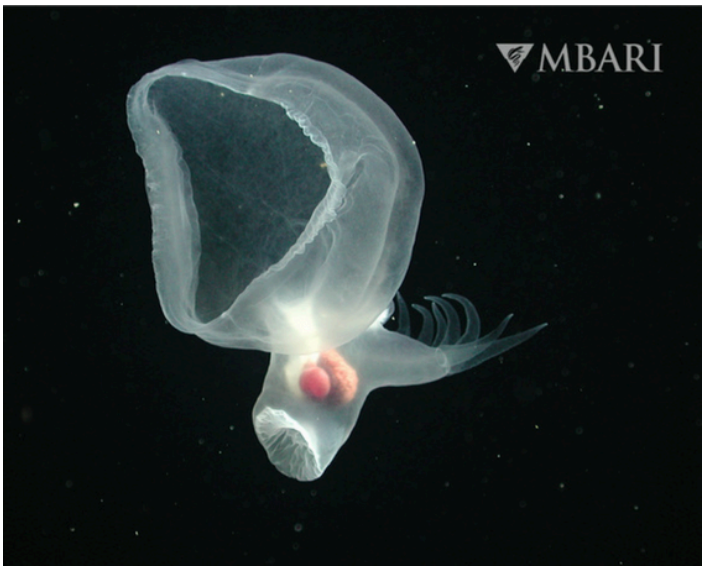


Figura 2. *B. caudactylus* observado por el ROV Tiburón (vehículo operado remotamente) del MBARI (Monterey Bay Aquarium Research Institute) en el Cañón de Monterey, a una profundidad aproximada de 1900 metros. En la zona de medianoche el alimento escasea y este misterioso molusco utiliza una gran capucha bucal para alimentarse de crustáceos ricos en nutrientes (Tomado de WoRMS, 2025).

hábitats bentónicos de aguas profundas, sin embargo, esta especie corresponde a una rama independiente y de divergencia temprana dentro de los nudibranquios. Otros atributos particulares de *B. caudactylus*, incluyen la ausencia de la placa bucal raspadora característica (llamada rádula) y una tasa extremadamente baja de consumo de oxígeno, lo que apunta a estrategias metabólicas clave para la vida en las profundidades del océano abierto.

3.2. *Chaetoderma shenloong*

Con una longitud mayor a los 150 mm (> 15 cm) es uno de los miembros más grandes conocidos de la clase de moluscos Caudofoveatea (Chen et al., 2024). Este grupo, se compone de habitantes de sedimentos con forma de gusano (vermifor-

mes) con diminutas escamas incrustadas en la piel en lugar de conchas (Fig. 3). El cuerpo alargado y esquivo de *C. shenloong* evoca al mítico y misterioso dragón chino Shén Loong, conocido por su representación en la popular serie de manga/anime "Dragon Ball" y de donde proviene el nombre común de la especie: " brillante gusano divino dragón". Este molusco fue descubierto en los sedimentos de una filtración de metano en el Mar de China Meridional; es el primer caudofoveato documentado de hábitats quimiosintéticos. Trabajos anteriores a la descripción formal de *C. shenloong*, dieron como resultado el primer ensamblaje del genoma a nivel cromosómico para Caudofoveata (como *Chaetoderma* sp.) (WoRMS, 2025).



Figura 3. *Ch. shenloong* sp. nov., fotografía de un espécimen tipo preservado. Holotipo A (TMBC031015) (Tomado de WoRMS, 2025).

3.3. *Cryptochaetosyllis imitatio.*

Este organismo es un gusano sílido que vive en corales blandos de los arrecifes tropicales del océano Indo-Pacífico occidental. Su cuerpo presenta colores brillantes, pocos segmentos, quetas pequeñas y simples, y cirros dorsales fusiformes grandes. Sus parientes más cercanos son gusanos muy segmentados, con cirros dorsales más cortos y parápodos más cortos y densos, además de grandes quetas articuladas (Jimi et al., 2024). La apariencia altamente modificada de *C. imitatio* ofrece dos posibilidades intrigantes, los patrones de color y el cuerpo frondeado parecen camuflarse contra los corales blandos ramificados, lo que sugiere la cripsis (capacidad de un organismo para ocultarse) como medio para evadir a sus depredadores. Sin embargo, el cuerpo estrecho de este gusano, sus escasas pero largas proyecciones junto con los colores brillantes recuerdan fuertemente la forma de los nudibranquios (moluscos) (Fig. 4), cuya dieta de tejido cnidario y capacidad de secuestrar cápsulas urticantes hechas por sus presas ofrece una formidable defensa contra la depredación. Aunque aún no se han determinado los detalles de la interacción entre los gusanos, su coral blando huésped y los nudibranquios, parece probable que la inusual morfología de *C. imitatio* les permita vivir en ecosistemas arrecifales repletos de depredadores y competidores.



Figura 4. *C. imitatio* sin segmentos posteriores (izquierda) se compara, a la derecha, con el molusco nudibranquio *Coryphellina exoptata* (familia Flabellinidae). Ambos son especímenes vietnamitas de la bahía de Nhatrang (Tomado de WoRMS, 2025).

3.4. *Rhabdopleura emancipata.*

Los fósiles de graptolitos son famosos por su aplanamiento. El nombre de este linaje se inspira en su característica distintiva: los fósiles de las colonias dejan marcas garabateadas en la roca. El descubrimiento de la conexión entre los graptolitos fósiles y los hemicordados de pterobranquios modernos ha ayudado a resolver algunas preguntas interesantes sobre este enigmático grupo.

Los hemicordados de pterobranquios son animales coloniales filtradores y, como su nombre indica, están estrechamente relacionados con los cordados, aunque la relación precisa entre este linaje, los equinodermos y los cordados sigue siendo poco clara. Si bien los graptolitos eran lo suficientemente diversos y abundantes como para ser útiles como fósiles de índice geológico, los pterobranquios modernos no presentan una gran riqueza de especies. Antes de los estudios en aguas profundas frente a Nueva Zelanda, el grupo estaba representado únicamente por ocho formas existentes, pero ahora se han descubierto cuatro nuevas especies. Entre estas nuevas especies de Nueva Zelanda, *R. emancipata* (Gordon, Quek y Huang, 2024) presenta una morfología desconocida entre los pterobranquios modernos, con una colonia compuesta por una maraña tridimensional de ramas (Fig. 5). Todos los demás pterobranquios modernos tienen una colonia que se ramifica solo en una superficie. La forma de crecimiento de *R. emancipata* ofrece un contexto importante para la interpretación de la estructura tridimensional de los famosos graptolitos fósiles planos.

3.5. *Abyssocladia johnhooperi.*

El viaje del RV Falkor por las aguas de Australia en 2020/2021 resultó en la recolección de muchas especies nuevas, incluyendo un coral negro y una esponja que fueron reconocidos dentro de las diez mejores especies marinas en 2022 y 2023. Ahora, uniéndose a los hallazgos de Falkor está *A. johnhooperi* (Ekins y Wilson, 2024) que es una esponja cladorrícida carnívora.

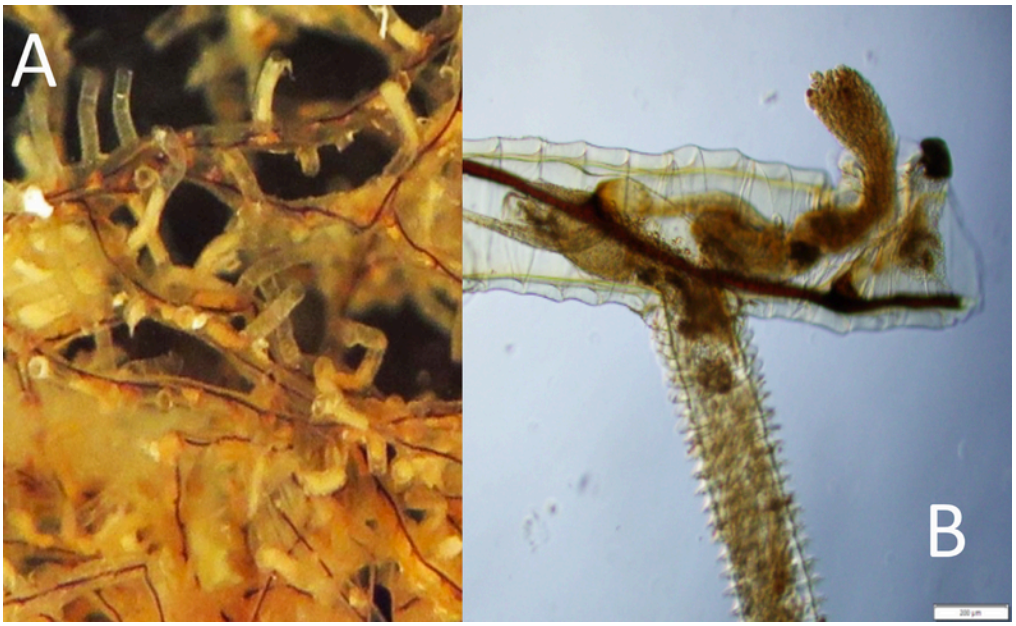


Figura 5. *Rh. emancipate*. A) Colonia; B) Acercamiento de un individuo (Tomado de WoRMS, 2025).

La familia Cladorhizidae se caracteriza por una forma de crecimiento ramificada y arbustiva, que puede alcanzar hasta 3 metros de longitud. El cuerpo está compuesto por un esqueleto de espículas, que proporcionan soporte estructural y defensa contra depredadores. Las estructuras de alimentación de la esponja son espículas modificadas, que pueden ser largas y puntiagudas, o ramificadas y con forma de maza. Como la mayoría de los miembros del género *Abyssocladia*, *A. johnhooperi* tiene una corona radiante y ascendente, similar a un paraguas sobre un tallo corto (Fig. 6). Los datos genéticos de los especímenes recolectados por el RV Falkor, muestran que Australia alberga múltiples linajes de esponjas carnívoras de aguas profundas.



Figura 6. *Ab. johnhooperi* sp. nov., Holotipo WAMZ100664 in situ, antes de su recolección (Tomado de WoRMS, 2025).

3.6. *Apseudes ranma.*

Los tanaidos son un grupo de crustáceos emparentados con los isópodos (cochinillas de playa) y parecen un isópodo extendido longitudinalmente. Pertenecen a un grupo mayor, los Malacostraca, por lo que son sus parientes otros crustáceos como cangrejos, camarones, langostas y kril.



Figura 7. Vista dorsal del hermafrodita *Ap. ranma* (Tomado de WoRMS, 2025).

*A. ranma*se encontró en el 2009 en el Acuario Público del Puerto de Nagoya, donde se introdujo en un acuario (Fig. 7) . Desde entonces, los científicos han mantenido y criado estos crustáceos para diversos estudios. A través de su investigación los científicos descubrieron no solo que es hermafrodita (algo inusual entre los crustáceos), sino que también es la primera especie entre las 67.000 especies de malacostrácidos capaz de autofecundarse, lo que le permite reproducirse sin pareja. En 2024, 15 años después de su descubrimiento, observaciones detalladas de su morfología confirmaron que se trata de una nueva especie. Se le nombró *A. ranma* (Matsushima y Kakui, 2024) inspirado en Ranma Saotome, personaje del manga japonés Ranma ½. En el manga, Ranma puede cambiar de sexo de macho a hembra al rociarse con agua hirviendo o fría, lo que alude a la naturaleza hermafrodita de este peculiar crustáceo japonés.

3.7. *Anthuroniscus shimomurai.*

Los isópodos son un grupo de crustáceos que incluye más de 10.000 especies, incluyendo las especies terrestres conocidas como cochinillas, cochinillas de humedad. Sin embargo, más de la mitad de las especies de isópodos viven en el océano, y algunas especies marinas han desarrollado estilos de vida parasitarios.

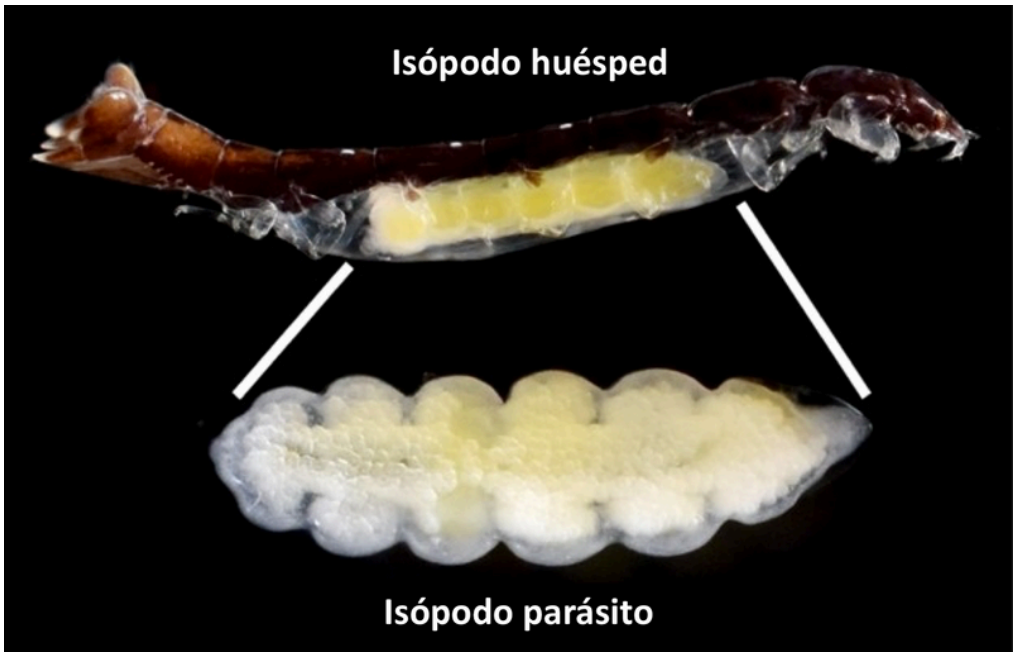


Figura 8. Isópodo hospedero *Mesanthura sp.* (ICHUM8644) parasitado por una hembra del isópodo parásito An. shimomurai sp. 631 nov. (ICHUM8643) durante la crianza; ejemplar vivo (Tomado de WoRMS, 2025).

Otras incluso han llevado su estilo de vida al extremo y ya no se parecen en nada a isópodos ni crustáceos.

La nueva especie conocida como isópodo con forma de frijol de Shimomura, o *A. shimomurai* (Shiraki y Kakui, 2024), es un claro ejemplo pues parasita la bolsa de cría de otros isópodos. El parásito tiene un cuerpo alargado, algo poco común entre los isópodos parásitos (Fig. 8). Tras encontrar un isópodo huésped adecuado, el parásito expulsa los huevos de este y vive el resto de su vida cómodamente en la bolsa de cría de su huésped. Este notable parásito debe su nombre al Dr. Michitaka Shimomura, quien contribuyó enormemente a la taxonomía de los isópodos en Japón.

3.8. *Caymanostella scrippscognaticausa*

La mayor parte del gran fondo marino profundo es un desierto, donde el alimento escasea y la vida escasean. Sin embargo, cuando ramas, troncos o incluso árboles enteros se hunden en el fondo, crean oasis submarinos, focos de vida, incluyendo la recién descrita *C. scrippscognaticausa* una de las tres nuevas especies de este género descritas en el 2024 año en el mismo artículo (Shen et al., 2024).

A diferencia de las estrellas de mar conocidas, que se encuentran en las pozas de marea, estas inusuales estrellas de mar han desarrollado notables adaptaciones para la vida en la madera sumergida. Tienen el cuerpo aplanado, la boca agrandada para maximizar el contacto con su hábitat leñoso y poseen espinas especializadas que les ayudan a sujetarse. Los científicos aún no están seguros de si estas estrellas de mar se alimentan directamente de la madera en que habitan o si depredan a otros animales o microbios que colonizan la madera en descomposición. Sin embargo, es cierto que forman parte de una comunidad altamente especializada que depende de la descomposición de la madera en las grandes

profundidades marinas. *C. scrippscognaticausa* (Fig. 9) recibió su nombre en honor a los miembros más jóvenes de la familia Scripps, "Primos con Causa", quienes generosamente apoyan la investigación oceánica.



Figura 9. Vista en vivo de un paratipo de *C. scrippscognaticausa* Shen et al. 2024. (Tomado de WoRMS, 2025).

3.9. *Gigantactis paresca*

A unos 1000 metros bajo la superficie del océano, vive el rape de aguas profundas *G. paresca*, recientemente descrito. Este pez fue capturado durante una expedición en 2021 en la Zona Clarion Clipperton, una vasta región del Océano Pacífico destinada a la minería en aguas profundas. Lo que hace al *G. paresca* particularmente fascinante es la inusual morfología de su cebo: a diferencia de cualquier otro rape conocido, posee no una sino dos estructuras similares a cebos (Fig. 10). Si bien muchos rapes son conocidos por sus largos cebos bioluminiscentes (que utilizan para atraer a sus presas) el *G. paresca* posee un segundo cebo no brillante, una característica sin prece - dentes que inspiró el nombre de la especie, "paresca", que significa "par de cebos" (Rickle, 2024). Las observaciones con ROV de aguas profundas realizadas por pescadores sugieren que esta especie nada boca abajo, utilizando su señuelo largo para explorar el fondo marino en busca de presas. La estructura de la mandíbula de *G. paresca* refuerza esta teoría, ya que sus grandes dientes inferiores, curvados hacia atrás, funcionan eficazmente como una mandíbula superior al estar invertidos. Aunque este tipo de rape suele vivir a grandes profundidades, las recientes investigaciones con ROV han revelado más avistamientos de gigantactínidos.



Figura 10. Vista lateral de *G. paresca*. Como proyeccion de la mandibula superior hacia la parte dorsal posterior, se puede observar la espina que lleva dos "cebos": uno en forma de pez y otro en forma de cuerda con una especie de tentáculos en el extremo (Tomado de WoRMS, 2025).

3.10. *Incertasquilla chimera*

La quimera camarón-mantis se descubrió recientemente en las costas del oeste de Australia y Japón, pertenece a uno de los grupos de depredadores marinos más fascinantes: el camarón mantis. Este camarón posee unos de los ojos más complejos del reino animal y uno de los ataques más rápidos de la naturaleza; algunas especies pueden golpear con una fuerza

comparable a la de una bala del calibre .22. Sin embargo, en lugar de dar puñetazos potentes, *I. chimera* (Ahyong, Nakajima y Naruse, 2024) pertenece a la variedad de camarón mantis que ataca con lanza. Armado con grandes y espinosas garras rapaces, ataca con la velocidad del rayo para ensartar a presas desprevenidas.

Incluso entre los camarones mantis, esta nueva especie es excepcional. Es tan distintiva que los científicos crearon un nuevo género para ella, y ni siquiera encaja claramente en ninguna familia existente de camarones mantis. De hecho, su nombre de especie, quimera, proviene del hecho de que exhibe características diferentes a las de varios grupos de camarones mantis (Fig. 11). Este descubrimiento amplía nuestra comprensión de la diversidad del camarón mantis y plantea nuevas preguntas importantes sobre la historia evolutiva de algunos de los depredadores más apasionantes del océano.

4. Conclusiones

Descubrimientos como estos ponen de manifiesto lo poco que aún sabemos sobre nuestros océanos. El descubrimiento de nuevas especies marinas es esencial para la conservación de la biodiversidad, el avance científico y la sostenibilidad del planeta. Aunque estamos en plena era globalizada, los esfuerzos sistemáticos en investigación científica sobre la biodiversidad de nuestros océanos aún es limitada, por lo que los esfuerzos mundiales como la de La Alianza Decenio del Océano, coordinada por las Naciones Unidas.

La alianza Global Ocean Census ha llevado a cabo, hasta la fecha, diez expediciones globales y ha organizado ocho talleres de descubrimiento de especies, otorgando 19 premios de descubrimiento de especies a taxónomos de todo el mundo. De acuerdo con Mitsuyuki Unno, director ejecutivo de la Fundación Nippon, el océano cubre el 71% de nuestro planeta; sin embargo, se dice que hasta ahora solo se ha descubierto el 10% de la vida marina, lo que deja entre 1 y 2 millones de especies aún sin documentar. Los recientes hallazgos demuestran cómo la colaboración internacional puede mejorar nuestra comprensión de la biodiversidad oceánica.

Con tanto por descubrir, los biólogos marinos de todo el mundo agradecen a todos aquellos que



Figura 11. *Incertasquilla chimera* colectada en las costas del oeste de Australia y Japón (Tomado de WoRMS, 2025).

apoyan las ciencias oceánicas, incluyendo agencias de financiación, donantes, periodistas y lectores curiosos como usted y yo.

5. Referencias

Ahyong S.T., Nakajima H. Naruse T. 2024. A new genus and species of mantis shrimp from Australia and Japan (Crustacea: Stomatopoda), with a revised diagnosis of Tetrasquillidae and a key to its genera. Journal of Crustacean Biology, 44: ruae038.

Castillo García, N. 2013. 70 por ciento de las especies marinas son desconocidas para la ciencia. Ciencia UNAM. Consultado 11/06/2024.

Chen C., et al. 2024. Integrative taxonomy of a new giant deep-sea caudofoveate from South China Sea cold seeps. Zoosystematics and Evolution. 100(3): 841-850.

Ekins M., Wilson N.G. 2024. New carnivorous sponges (Porifera: Cladorhizidae) from Western Australia, collected by a Remotely Operated Vehicle (ROV). Scientific Reports, 14(1): 22173.

Gordon D.P., Quek Z.B.R., Huang D. 2024. Four new species and a ribosomal phylogeny of *Rhabdopleura* (Hemichordata: Graptolithina) from New Zealand, with a review and key to all described extant taxa. Zootaxa, 5424(3): 323-357.

Hutchins R. 2025. Over 800 new species discovered in world's biggest ocean mission. Oceanographic. Consultado 13/06/2025.

Jimi N., et al. 2024. A new genus and species of nudibranch-mimicking Syllidae (Annelida, Polychaeta). Scientific Reports, 14(1)17123: 1-11.

Matsushima Y., Kakui K. 2024. *Apseudes ranma* sp. nov. (Tanaidacea: Apseudidae) found in a public aquarium, with notes on phylogeny and a presumptive stridulatory organ. Bulletin of Marine Science, 100: 451–469.

ONU (Organización de Naciones Unidas). 2025. Maravillas oceánicas: sostener lo que nos sustenta. UN. Consultado 11/06/2024.

ONU (Organización de Naciones Unidas). 2015. La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. UN. Consultado 13/06/2025.

Rickle, S. Z. 2024. A New Species of the Anglerfish Genus *Gigantactis* (Lophiiformes: Ceratioidei) from the Clarion Clipperton Zone of the Eastern North Pacific Ocean, an Ecosystem Threatened by Deep-Sea Mining. Ichthyology & Herpetology, 112(2).

Robison B.H., Haddock S.H. 2024. Discovery and description of a remarkable bathypelagic nudibranch, *Bathydevius caudactylus*, gen. et. sp. nov. *Deep Sea Research Part I:* Oceanographic Research Papers, 214: 104414: 1-8.

Shen Z., et al. 2024. Three New Species of Deep-Sea Wood-Associated Sea Stars (Asteroidea: Caymanostellidae) from the Eastern Pacific. Zootaxa, 5536(3): 351-388.

Shiraki S., Kakui K. 2024. Isopods on isopods: integrative taxonomy of Cabiropidae (Isopoda: Epicaridea: Cryptoniscoidea) parasitic on anthuroid isopods, with descriptions of a new genus and three new species from Japan. Invertebrate Systematics, 38(8): IS24013.

UNESCO. 2024. Diez nuevas especies marinas destacadas a partir de 2023: WoRMS. OCEANDECADE. Consultado 03/06/2025.

WoRMS. 2025. Ten remarkable new marine species from 2024. WoRMS. Consultado 03/06/2025.



Dra. Norma Y. Hernández Saavedra. Investigadora Titular, CIBNOR. Sistema Nacional de Investigadores Nivel 2. Scopus, Research Gate, ORCID, Academia.



En laberintos de cuevas de coral

Arturo Sánchez-Paz
Laboratorio Virología. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Calle Hermosa, 101, Col. Los Ángeles. Hermosillo, Sonora. México. CP. 83106.

Rara vez somos conscientes de un fenómeno cautivador e inevitable que ocurre desde que nacemos hasta nuestra muerte: nos integramos a una inmensa y extraordinariamente variada comunidad de organismos vivos. Nuestra especie tiene la fortuna de ser vecina de cada uno de los innumerables y magníficos moradores de este planeta. Sin embargo, esta verdad se nos escapa irresponsablemente, con el paso del tiempo, en un desencuentro abusivo con la naturaleza. Y somos tan ciegos, tan vanidosos que nuestro pobre antropocentrismo se revela bastante ingenuo al no reconocer que solo somos una especie más que habita esta colosal y húmeda roca que gira ininterrumpidamente en un punto con las condiciones exactas que permitieron el florecimiento de la vida en medio de la obscura y fría vastedad del espacio.

A pesar de que conocer el número de especies que habitan nuestro planeta es una cuestión fundamental para la biología y otras ciencias afines, esta información es aún incierta. Hoy, se han descrito *formalmente* cerca de dos millones de especies, pero es evidente que este número es casi irreal. Estimados recientes han calculado que tan sólo el número de especies de procariontes (bacterias y arqueas) oscila entre dos millones (2,000,000) y un billón (1,000,000,000,000). Así, Larsen y colaboradores sugirieron en 2017 que el número total de especies con las que convivimos en este planeta deber estar entre uno y seis billones (6,000,000,000,000). Este número no incluye, desafortunadamente, a los entes biológicos más abundantes del planeta: los virus. Si estos parásitos se consideraran, el número de especies con las que convivimos sería de varias decenas de billones. Queda claro,

como decía el Premio Nobel José Saramago en su extraordinaria novela *La Balsa de Piedra*, que "*el mundo de cada uno es lo que ven sus ojos. Y los ojos ven lo que quieren, los ojos hacen la diversidad del mundo y fabrican maravillas*".

Pero ¿de dónde provienen todas las especies que conocemos? Antes de Darwin ya se había sugerido varias veces, y en diferentes épocas, que las especies evolucionan, se originan, a partir de formas ancestrales. Así, Jean Baptiste Lamarck propuso, por ejemplo, la "*teoría de la transmutación de las especies*". Lamarck no creía que las distintas formas de vida que habitan nuestro planeta compartían un ancestro común, sino que gran variedad de formas simples habían sido "*creadas*" continuamente por "*generación espontánea*". Estas formas simples incrementan su complejidad mediante una "*fuerza vital interna*" que provoca cambios en la estructura de los organismos dependiendo de su uso (o desuso). Si esta variación se utiliza constantemente tenderá a aumentar su tamaño y si no se usaba se atrofiaría hasta desaparecer. Dichos cambios se deberían heredar a la siguiente generación produciendo una "*adaptación*" al medio en el que los organismos habitan, lo que se conoció como la *idea de la herencia de los caracteres adquiridos*, una opinión que no era suya y que jamás reivindicó como propia. Lamarck uso el ejemplo del largo cuello de las jirafas para ilustrar esta idea en su libro *Philosophie Zoologique* publicado en 1809. De acuerdo con Lamarck, la longitud del cuello de las jirafas se adquirió a través de innumerables generaciones de jirafas que habían estirado repetida y frecuentemente el cuello para alcanzar las hojas de los árboles de acacia que consumen para su alimentación, lo que había generado pequeños cambios que se transmitieron y acumularon paulatinamente en las siguientes generaciones de jirafas hasta alcanzar la longitud actual.

Lo que definitivamente enorgullecía a Lamarck era el haber promovido las ideas de que *la naturaleza produce, sucesivamente, todas las formas de vida de la Tierra* y de que los cambios de comportamiento *inducidos por el medio ambiente marcan el camino de la variabilidad de las especies* (es decir, los organismos se *adaptan* a las condiciones ambientales). Así, en un curso que impartía en el Museo de Historia Natural de París, Francia, les comentó a sus estudiantes "*… Puedo demostrar que no es la forma, ni del cuerpo ni de sus partes, la que da origen a los hábitos y al modo de vida de los animales, por el contrario, los hábitos, el modo de vida y todas las demás circunstancias han influido, con el tiempo, en la constitución de la forma del cuerpo y de las partes de los animales. Con las nuevas formas se han adquirido nuevas facultades, y poco a poco la naturaleza ha llegado al estado en que se encuentra*". Para Lamarck era muy claro que los organismos vivos se "*adaptan*" a las condiciones de su entorno. Desafortunadamente, no siempre se recuerda a los científicos por las ideas que más apreciaron, y en este caso a Lamarck se le recuerda más por la idea de la *herencia de los caracteres adquiridos*, misma que fue ampliamente criticada, refutada y ridiculizada por la comunidad científica.

Por algunos años, no se propuso un mecanismo plausible que explicara la forma en la que los organismos evolucionan, hasta que en 1859 Charles Darwin publicó "*El Origen de las Especies*", donde planteó que pequeñas variaciones heredables entre los individuos de una especie son la base de las grandes variaciones entre especies.

De acuerdo con esto, los organismos de cierta población que presenten algunas variantes morfológicas, fisiológicas o de comportamiento podrán sobrevivir si esas diferencias los hacen más *aptos* biológicamente y se reproducirán a diferentes tasas dependiendo del ambiente en el que habiten. Esta diferencia en las tasas de reproducción resultará en pequeños cambios dentro de una población a lo largo del tiempo originando un reemplazo gradual de una especie por otra. De esta forma, si dos poblaciones diferentes de la misma especie ocupan diferentes nichos, una de ellas divergirá, al *adaptarse* a un nuevo entorno, y eventualmente se convertirá en una nueva especie.

Jacques Lacan menciona en su libro *El Seminario* (17, el reverso del psicoanálisis) que "*son siempre las cosas más visibles, las que se exhiben, las que menos vemos*". Mientras que las cosas extraordinarias, las obras magníficas, las modas extravagantes, los artistas excepcionales llaman nuestra atención, lo obvio suele pasar desapercibido, precisamente por obvio. Hoy, en el agobiante ajetreo de la vida diaria, dejamos de percatarnos de lo maravilloso que es el mundo que nos rodea y pareciera no sorprendernos lo bien que cada especie encaja en el hábitat en el que vive. Cada especie que habita nuestro planeta cuenta con la morfología, fisiología y comportamiento más "*adecuados*" para sobrevivir a las condiciones del mundo que actualmente les rodea. Sin embargo, hay que hacer notar que para que las *especies* se *adapten* y sobrevivan a un mundo de constantes cambios, los descendientes de algunos de los organismos que las constituyen deben poseer variaciones genéticas precisas para responder a dichos cambios ambientales. Así, por ejemplo, solo aquellos descendientes de los organismos marinos que actualmente habitan nuestros océanos que tengan la fortuna de expresar los genes con las variaciones adecuadas poseerán las adaptaciones necesarias para sobrevivir eventualmente al inminente calentamiento y acidificación de los océanos. Las especies cuyas variaciones no sean convenientes para adaptarse a las nuevas condiciones, se extinguirán inevitablemente. Estas variantes son la materia prima sobre la que actúa, ciegamente, la *Selección Natural*.

Hace aproximadamente 530 millones de años, una importante época en la historia de la vida en la Tierra marcada por una rápida evolución de los ecosistemas animales marinos, apareció un grupo animal, los *cefalópodos*, que por muchas décadas no solo ha capturado la atención de la comunidad científica por su compleja neurofisiología, sus sofisticadas e intrigantes respuestas conductuales a paradigmas experimentales específicos, sus llamativas e impetuosas exhibiciones de camuflaje y una previsible conciencia de sí mismos (posiblemente similar a la de vertebrados e insectos), sino que han sido una basta fuente de inspiración para escritores, pintores, escultores, músicos, historiadores, medios de comunicación y creencias espirituales al ser considerados protectores divinos, guías o incluso deidades. Los cefalópodos son un grupo de animales marinos entre los que se incluyen todas las especies de calamares, pulpos, sepias y nautilus.

Desde su aparición, los *cefalópodos*, junto con algunas otras afortunadas especies, han sobrevivido a cinco eventos de extinción masi-

va. Cada uno de estos cataclismos se caracterizó por una drástica disminución de la biodiversidad mundial y en su conjunto dejaron un profundo impacto en el curso de la vida en la Tierra. Así, por ejemplo, el tercer periodo de extinción, conocido como la Extinción del Pérmico o la Gran Mortandad, ocurrió hace aproximadamente 252 millones de años y se le considera el evento de extinción más brutal que haya acontecido en la historia de la Tierra ya que provocó la desaparición del 70% de las especies terrestres de vertebrados y del 80-96% de las especies marinas de invertebrados que existían en ese entonces. Las causas específicas que provocaron estas extinciones siguen siendo objeto de debate y se han propuesto que ocurrieron por diversos factores, como la actividad volcánica de proporciones extraordinarias, el impacto de asteroides, o algún incidente temporal y súbito que modificó el clima.

Obviando a las amonitas y a las belemnitas (ambos grupos de cefalópodos eran similares a los calamares actuales, pero las amonitas poseían una concha en forma de espiral) que se extinguieron junto con los dinosaurios hace unos 66 millones de años durante el último evento de extinción masiva, resulta claro que los cefalópodos han fijado, a través del perseverante escrutinio de la Selección Natural, diversas *adaptaciones* para sobrevivir a los innumerables cambios ambientales que han ocurrido en nuestro planeta y a cinco eventos de extinción. Algunas de estas *adaptaciones* son tan "*raras*" que en 2018 un grupo de investigadores de una docena de países sugirió, por sorprendente que parezca, en un artículo plagado de suposiciones altamente inverosímiles, fantasiosas e incuantificables y sin evidencias sólidas que sostengan esta idea, que los cefalópodos, especialmente los pulpos, pudieran tener un origen extraterrestre.

Cada célula de los organismos vivos contiene un genoma (el conjunto total de ADN), un transcriptoma (el conjunto de todas las moléculas de ARN, también llamadas transcritos) y un proteoma (el conjunto de todas las proteínas expresadas). Si bien estos componentes se ubican en dimensiones diferentes en el flujo de la información genética, juntos configuran un marco integral y crucial para el funcionamiento de cada uno de los complejos procesos biológicos que ocurren en las células. Así, el genoma contiene las instrucciones necesarias para que cada célula posea estructura, sea funcional y regule sus procesos. El genoma da instrucciones al transcriptoma para que a través de él se expresen ciertas proteínas bajo condiciones específicas o tipos celulares particulares. Así, el transcriptoma representa cada uno de los genes que se expresan en un momento dado (además de un número importante de ARN que no producirán proteínas (ARN no codificante) y otras variedades, como microARN y ARN circular). El proteoma, finalmente, está representado por todas y cada una de las proteínas que se expresan en la célula.

Desde hace algunas décadas quedó claro que la composición y complejidad del transcriptoma pueden explicar la sofisticación celular y funcional de los eucariotas superiores. Aún más, apenas hace unos años se elucidaron nuevos mecanismos moleculares a nivel transcriptoma que también contribuyen a incrementar las capacidades celulares, conocidos como "*eventos de procesamiento del ARN*", entre las que se

encuentran las modificaciones del ARN. Si bien hay más de 100 tipos de modificaciones del ARN, una de ellas llama la atención debido a que le brinda a los organismos nuevos medios para adaptarse rápidamente ante presiones externas que podrían afectar su sobrevivencia. A este tipo de modificaciones se les ha denominado "edición del ARN". La forma más frecuente de este tipo de modificaciones al ARN, la "edición de adenosina a inosina" (edición A-a-I), se lleva a cabo mediante la reacción catalizada por la enzima "*adenosina deaminasa que actúa sobre el ARN* (ADAR, por sus siglas en inglés)" en la que los nucleótidos de adenosina (A) son "*convertidos*" en inosinas (I). Así, cada adenosina que se encuentre en la secuencia de algún transcrito será intercambiada por una inosina y cuando estas son procesadas por los ribosomas para sintetizar alguna proteína, este cambio es interpretado como guanosina (G), en lugar de las adenosinas codificadas en el gen original. Cuando estos cambios ocurren en las secuencias de transcritos que codifican proteínas se les denomina "*recodificantes*" ya que producen proteínas diferentes a las originales. Este proceso de edición de ARN es utilizado muy raramente para recodificar proteínas en la mayoría de los organismos. Por ejemplo, se han identificado millones de sitios con el potencial de ser editados en los transcritos del ser humano y algunos miles de sitios en ratones, sin embargo, la mayoría se localizan en regiones de ARN que no codifican proteína alguna, y solo el 1-3% de los transcritos de humanos y de la mosca de la fruta (*Drosophila melanogaster*) albergan un sitio recodificante. En contraste, este curioso fenómeno molecular es la norma entre los cefalópodos (en calamares, pulpos y sepias, 60% de todos los transcritos que codifican para proteínas son recodificantes, lo que les brinda la posibilidad de diversificar su proteoma).

Hasta hace muy poco tiempo no se comprendía bien la razón por la que los cefalópodos son tan propensos a editar su ARN (por supuesto, no es algo que ocurra por voluntad propia). En 2012 se publicó un artículo en el que se observó que, en dos especies de pulpos que habitan en los polos, la frecuencia con la que algunos genes que codifican proteínas que forman canales por donde transitan algunos iones que facilitan la comunicación eléctrica entre neuronas era mucho más frecuente, en comparación con lo observado en una especie de pulpo tropical. Los cambios resultantes tras la edición del ARN en una de las proteínas de dichos canales de pulpos polares provocaron que estos se abran y cierren 14 y 60 veces más lento, respectivamente, que los canales iónicos de la especie tropical. Sin estos cambios a nivel proteína las especies que habitan en las heladas aguas polares presentarían una reducción importante en la velocidad de contracción y fuerza muscular, características esenciales para escapar de predadores o para capturar una presa, por ejemplo. Desafortunadamente, las especies estudiadas no se sometieron individualmente a cambios experimentales agudos de temperatura, por lo que fue difícil definir si las variaciones en las proteínas de los canales iónicos tras la edición del ARN que las codifica fueron resultado de una aclimatación o una adaptación real.

Pero el tiempo, si se tiene suficiente paciencia y perseverancia, suele dar oportunidades para alcanzar metas importantes. Mijaíl Kutúzov, un personaje central de carácter irascible que logra la victoria del ejército ruso derrotando a Napoleón en la obra de León Tolstoi "La Guerra y La Paz", menciona que "…para ganar la campaña (bélica)… lo único que se necesita es paciencia y tiempo". En este caso, el tiempo fue determinante para entender si la edición del ARN les otorga alguna ventaja adaptativa a los cefalópodos. En 2023, dos estudios realizados por grupos diferentes demostraron que la edición de ARN en una especie de pulpo (*Octopus bimaculoides*) y una de calamar (*Doryteuthis pealeii*) induce cambios reversibles en la estructura de algunas proteínas en cuestión de unas 3-4 horas, dependiendo de la temperatura a la que se encuentren expuestos. Así, Birk y colaboradores (2023) observaron que la estructura y función de un par de proteínas involucradas en actividades neuronales críticas del pulpo (*O. bimaculoides*), la *sinaptogamina* (un sensor de la concentración de calcio para desencadenar la liberación de neurotransmisores) y la *cinecina* (una "*simpática*" proteína que parece caminar a través de microtúbulos, encargada del transporte de vesículas ricas en proteínas que son sintetizadas en el retículo endoplásmico rugoso y el aparato de Golgi, y que deben incorporarse en su destino apropiado cerca de la membrana celular) se modifican debido a la edición del ARN tras un cambio en la temperatura del agua en la que habitan estos organismos. Ese mismo año, Rangan y Reck-Peterson, observaron que en el calamar *Doryteuthis pealeii* existen variedades de cinecina recodificada mediante edición del ARN que, a bajas temperaturas, poseen mayor movilidad. De este modo queda claro que la recodificación del ARN en los cefalópodos produce variantes únicas de cinesina con propiedades funcionales optimizadas, lo que genera plasticidad fenotípica al diversificar la funcionalidad de las proteínas. Ambos estudios sugieren, por lo tanto, que, para los cefalópodos, y quizás para otros poiquilotermos, la edición del ARN parece ser una adaptación valiosa de ajuste de la función neurofisiológica, y muy probablemente otras, en respuesta a cambios en la temperatura. Al conocer los maravillosos secretos moleculares que las diversas formas de vida que habitan nuestro planeta esconden, deberíamos, quizá, ser menos vanidosos y orgullosos, y, sin falsa humildad, disfrutar el prodigio de convivir con el resto de las especies que nos acompañan y la gracia de su presencia. Descubrir, entender y apreciar las exquisitas e innumerables adaptaciones de las distintas formas de vida que habitan nuestro planeta nos vincula estrechamente a ellas, valorar y respetar al resto de los esplendidos inquilinos biológicos de este asombroso mundo nos hace miembros efectivos de la naturaleza. Porque, mientras no tengamos conciencia del mundo que nos rodea, nos aislamos. Como escribió José Saramago en El Año de la Muerte de Ricardo Reis *"…soledad es no ser capaz de hacer compañía a alguien*".

Referencias

Birk, M.A., Liscovitch-Brauer, N., Dominguez, M.J., McNeme, S., Yue, Y., Hoff, J.D., Twersky, I., Verhey, K.J., Sutton, R.B., Eisenberg, E., y Rosenthal, J.J.C. (2023). Temperature-dependent RNA editing in octopus extensively recodes the neural proteome. Cell, 186(12), 2544-2555.e13.
doi: 10.1016/j.cell.2023.05.004.

doi.org/10.5281/zenodo.15869956

Rangan, K.J., y Reck-Peterson, S.L. (2023). RNA recoding in cephalopods tailors microtubule motor protein function. Cell, 186(12):2531-2543.e11. doi: 10.1016/j.cell.2023.04.032.

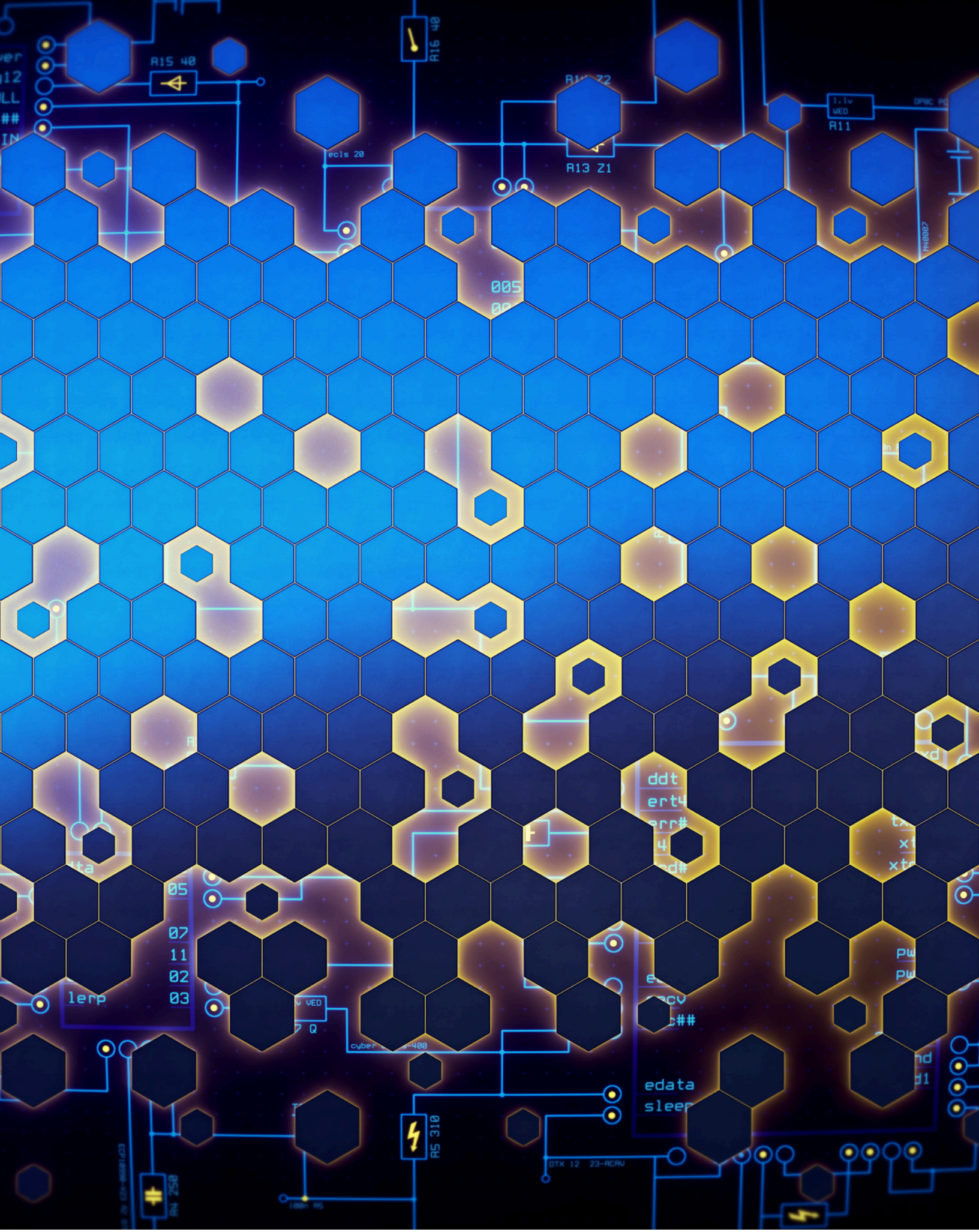
Steele, E.J., Al-Mufti, S., Augustyn, K.A., Chandrajith, R., Coghlan, J.P., Coulson, S.G., Ghosh, S., Gillman, M., Gorczynski, R.M., Klyce, B., Louis, G., Mahanama, K., Oliver, K.R., Padron, J., Qu, J., Schuster, J.A., Smith, W.E., Snyder, D.P., Steele, J.A., Stewart, B.J., Temple,

R., Tokoro, G., Tout, C.A., Unzicker, A., Wainwright, M., Wallis, J., Wallis, D.H., Wallis, M.K., Wetherall, J., Wickramasinghe, D.T., Wickramasinghe, J.T., Wickramasinghe, N.C., y Liu, Y. (2018). Cause of Cambrian explosion - Terrestrial or cosmic? Progress in Biophysic and Molecular Biology. 136:3-23. doi: 10.1016/j.pbiomolbio.2018.03.004.



El Dr. Arturo Sánchez-Paz es investigador titular encargado del Laboratorio de Virología del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste en Hermosillo, Sonora, México. Su investigación ha generado más de 50 artículos publicados en revistas científicas internacionales, y ha guiado y dirigido tesis de varios estudiantes de posgrado. Es miembro del SNI (nivel 2) y de la Academia Mexicana de Ciencias.

Cita:
Sánchez-Paz, A. (2025). En laberintos de cuevas de coral. Biotecnológica Magazine, 3(3), 80-86. https://doi.org/10.5281/zenodo.15869956


R15 40
R16 40
ecls 20
R13 Z1
R11
1.1v
WED
005
ddt
ert4
err#
05
07
11
02
03
lerp
edata
sleep
R5 310
R4 750
DTX 12 23-ACAV