

Biotecnológica[®] Magazine

Revista en línea de divulgación biotecnológica



Potencial terapéutico y otros
beneficios de las algas verdes del
género *Caulerpa*

NORMA Y. HERNÁNDEZ SAAVEDRA

Vol. 3, Número 5

Septiembre-Octubre 2025
www.biotmagazine.com



BIOTECNOLÓGICA MAGAZINE® año 2025, Vol. 3, No. 5, septiembre–octubre, 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: Marc Bruxelle a través de canva

Edición gráfica editorial y página web: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez.

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

EDITORORA

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** *Hacia una acuicultura sostenible del pulpo: El caso del pulpo verde del Pacífico Mexicano en el contexto global de la cefalopodicultura*
Manuel de Jesús Zúñiga-Panduro, Ramón Héctor Barraza- Guardado
- 14** *Potencial terapéutico y otros beneficios de las algas verdes del género Caulerpa*
Norma Y. Hernández Saavedra
- 23** *Sinergias que sanan: Turismo de Salud, Biotecnología y Sustentabilidad en Baja California Sur*
Felipe Ascencio
- 34** *Prochlorococcus, el maravilloso microorganismo que en secreto hace funcionar el planeta, podría estar en peligro*
Norma Y. Hernández Saavedra
- 41** *Avances recientes en la investigación del cáncer de mama*
Felipe Ascencio
- 50** *Descubrimientos sobre la Regulación del Sistema Inmunitario: El Nobel de Fisiología o Medicina 2025*
Felipe Ascencio
- 56** *El sereno y apacible estado de la necesidad*
Arturo Sánchez Paz
- 56** *Infografía. Baja california Sur: Destino emergente en turismo de salud*
Felipe Ascencio, Norma Y. Hernández Saavedra

EDITORIAL

Estimad@s Lector@s,

La biotecnología se ha consolidado como uno de los pilares más versátiles y prometedores de la ciencia contemporánea, capaz de tender puentes entre disciplinas que a primera vista parecerían distantes. En este nuevo número de **BiotecnoLógica Magazine**, exploramos precisamente esos cruces fértiles entre la biología marina, la salud humana, la sostenibilidad y la innovación tecnológica, con un enfoque que celebra la diversidad del conocimiento y su impacto tangible en la sociedad.

Abrimos con “Hacia una acuicultura sostenible del pulpo: El caso del pulpo verde del Pacífico Mexicano”, un recorrido por los avances y desafíos de la cefalopodicultura, un campo emergente que promete aliviar la presión sobre las pesquerías artesanales y aportar nuevas rutas hacia una acuicultura más responsable. La investigación sobre *Octopus hubbsorum* representa una de las fronteras más fascinantes para la ciencia mexicana, donde la biología del desarrollo, la ecofisiología y la ingeniería de sistemas de cultivo confluyen en un esfuerzo común por cerrar el ciclo de vida en cautiverio.

Continuamos con “Potencial terapéutico y otros beneficios de las algas verdes del género *Caulerpa*”, un artículo que revaloriza a estas algas como verdaderos laboratorios naturales. De sus tejidos se han aislado compuestos con propiedades antivirales, antiinflamatorias y anticancerígenas, abriendo una ventana al desarrollo de productos nutracéuticos y farmacológicos de origen marino que podrían transformar el bienestar humano y la economía azul.

Desde otra perspectiva complementaria, el texto “Sinergias que sanan: Turismo de Salud, Biotecnología y Sustentabilidad en Baja California Sur” propone un enfoque integrador entre innovación biomédica, economía circular y turismo responsable. Este análisis posiciona al estado como un destino emergente donde la ciencia y la hospitalidad convergen para generar modelos de desarrollo que priorizan la salud, la tecnología y el respeto por el entorno natural.

En la misma línea oceánica, la nota “*Prochlorococcus*, el maravilloso microorganismo que en secreto hace funcionar el planeta, podría estar en peligro” nos recuerda la fragilidad de la base de la vida marina. Este diminuto productor primario, responsable de una fracción esencial del oxígeno que respiramos, enfrenta amenazas directas derivadas del calentamiento global. Una llamada de atención que subraya la urgencia de proteger los equilibrios invisibles que sostienen la biosfera.

En el ámbito biomédico, “Avances recientes en la investigación del cáncer de mama” resume los progresos más significativos en terapias dirigidas, inmunoterapia y medicina de precisión. Este artículo destaca cómo la ciencia de frontera está redefiniendo la esperanza para millones de pacientes, demostrando que la biotecnología no solo transforma laboratorios, sino también vidas.

Como nota especial, celebramos la entrega del Premio Nobel de Fisiología o Medicina 2025 a Shimon Sakaguchi, Mary E. Brunkow y Fred Ramsdell, cuyas investigaciones sobre las células T reguladoras revolucionaron la comprensión del sistema inmunitario y abrieron nuevas posibilidades terapéuticas en enfermedades autoinmunes y cáncer.

En nuestra sección Filosofando, presentamos “El sereno y apacible estado de la necesidad”, una reflexión sobre la sabiduría que se esconde en las adversidades y la manera en que los “malos principios” pueden forjar finales venturosos, inspirada en una tradición gitana que resignifica la noción de la buena fortuna.

Finalmente, cerramos con la infografía “Baja California Sur: Destino emergente en turismo de salud”, que sintetiza los ejes estratégicos que están posicionando a la región como un referente de innovación, bienestar y sustentabilidad.

Este número reafirma la misión de BiotecnoLógica Magazine: comunicar la ciencia como una fuerza viva, cercana y transformadora. Desde el fitoplancton que oxigena el planeta hasta las terapias que renuevan la esperanza, cada avance biotecnológico nos recuerda que innovar desde el conocimiento es, en última instancia, una forma de cuidar la vida.

Consejo Editorial Fundador

Biotecnológica Magazine

Hacia una acuicultura sostenible del pulpo: El caso del pulpo verde del Pacífico Mexicano en el contexto global de la cefalopodicultura

Manuel de Jesús Zúñiga-Panduro¹, Ramón Héctor Barraza- Guardado^{*1}

¹Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora (DICTUS), Blvd. Luis D. Colosio s/n entre Reforma y Sahuaripa, Edificio 7G, C.P. 83000 Hermosillo, Sonora, México.

*Autor de correspondencia: ramon.barraza@unison.mx

Tema: La creciente demanda de pulpo en el mercado global ha ejercido una presión excesiva sobre las pesquerías artesanales a nivel mundial. Ante la necesidad de diversificar y asegurar la producción, y fomentar la recuperación de las poblaciones silvestres, el campo de la acuicultura de pulpo ha surgido como una de las áreas de investigación más dinámicas y prometedoras. A pesar de décadas de esfuerzos, el principal obstáculo para el desarrollo comercial a gran escala sigue siendo el cierre del ciclo de vida en cautiverio, un desafío que ha sido superado en muy pocas especies de pulpos. Con base en lo anterior, el presente trabajo sitúa la investigación sobre el pulpo verde del Pacífico Mexicano (*Octopus hubbsorum*), dentro de este panorama global. A pesar de su inmensa importancia como especie pesquera clave en el Pacífico Mexicano, por ser la principal especie de pulpo que es capturada artesanalmente en esta zona, la información científica sobre su biología reproductiva y desarrollo temprano (paralarva y juvenil) es escasa y fragmentada. Por lo que diversas instituciones académicas y de investigación, han mostrado gran interés en llenar este vacío de conocimiento, con la intención de desbloquear el potencial de cultivo de esta especie de gran valor comercial que aliviaría sin duda la presión sobre las poblaciones silvestres, y por lo tanto, sobre los ecosistemas marinos.

1. La Transición de la pesca a la acuicultura de pulpo

Los cefalópodos son el grupo de moluscos que incluye a los pulpos, calamares, sepias y nautilus. A nivel mundial, el cultivo de estos organismos, (conocido como *cefalopodicultura*) se encuentra en diferentes fases de desarrollo. En la actualidad existen al menos 17 especies de cefalópodos que están siendo estudiados como recursos con potencial acuícola (Villanueva et al. 2014).

En cuanto al pulpo se refiere, la producción pesquera a nivel mundial ha experimentado un crecimiento notable, impulsado por una demanda creciente en los mercados internacionales. Según datos de la Organiza-

ción de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), México ocupa el tercer lugar mundial en producción de pulpo (FAO, 2024), posicionándose como un actor clave en este sector. A nivel nacional, durante el 2024, se registró una producción en la captura de más de 34 mil toneladas, con un valor de más de 2 mil millones de pesos. Por otro lado, en la producción acuícola en el mismo periodo, se contabilizaron 214 kg con un valor de 22,571 pesos según datos de la Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA, 2024). Por lo tanto, la producción total de pulpo se fundamenta casi por completo en pesquerías de captura, lo que ha generado una presión considerable sobre las poblaciones silvestres.

Este panorama ha estimulado la búsqueda de alternativas de producción, y la acuicultura se presenta como una alternativa más viable para mitigar el impacto ambiental de la pesca y asegurar un suministro estable para el mercado. La diversificación de las fuentes de producción es necesaria para garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

Desde una perspectiva biológica, los pulpos poseen varias características que los convierten en candidatos atractivos para el cultivo. Su ciclo de vida es relativamente corto, con una longevidad que raramente supera los dos años (OctoNation, 2015). A esto se suma su rápida tasa de crecimiento, que puede alcanzar hasta el 29% de su peso por día, y una alta tasa de conversión alimenticia, lo que los hace eficientes en la producción de biomasa (Barrueta et al. 2021). Desde el punto de vista comercial, el pulpo común (*Octopus vulgaris*) es de gran interés en Europa y el Mediterráneo, con una demanda creciente también en mercados como el de Estados Unidos de América (IEO, 2018). Esta viabilidad económica, junto con las ventajas biológicas mencionadas, han impulsado la investigación para domesticar a estos cefalópodos, lo que se ha convertido en un objetivo central en la acuicultura marina moderna.

2. El Pulpo verde del Pacífico: distribución, biología y ecología para la acuicultura

El pulpo verde del Pacífico (*Octopus hubbsorum*) presenta una etapa larvaria llamada "paralarva planctónica", que habita en la columna de agua. Mientras la paralarva se desarrolla y transforma en un pulpo juvenil, se va asentando en el fondo marino, donde habitará el resto de su vida.

Esta especie es de tamaño medio y se encuentra únicamente en el Pacífico tropical oriental (Fig. 1). Su distribución geográfica abarca desde la parte central del Golfo de California hasta el litoral sur de Oaxaca, en México. A pesar de que la pesquería del pulpo en esta región incluye varias especies, el pulpo verde es el principal objetivo de pesca y representa casi la totalidad de la captura en esta zona, con una producción anual de alrededor de 1,000 toneladas por año (Plata & Herrera, 2014).

La alta presión pesquera sobre una especie de gran importancia económica contrasta con la marcada escasez de información científica básica sobre su biología y ecología. Este vacío de conocimiento genera una situación de riesgo para la sostenibilidad de la pesquería artesanal, de la cual dependen numerosas comunidades costeras.



Figura 1. Pulpo verde el Pacífico Mexicano (*Octopus hubbsorum* Berry, 1953). Fuente: Manuel Zúñiga Panduro.

Al carecer de un entendimiento profundo de aspectos fundamentales como la reproducción y el desarrollo, se vuelve extremadamente difícil implementar estrategias de cultivo adecuadas y sostenibles a largo plazo. Por lo tanto, investigar estos temas no debería ser solamente un ejercicio académico, sino un paso crítico para el desarrollo acuícola del pulpo y al mismo tiempo, fomentar la recuperación de las poblaciones silvestres.

2.1 Avances en la descripción del desarrollo embrionario y paralarval

El desarrollo embrionario y larvario del pulpo verde fue caracterizado por primera vez en 2013, donde se describieron sus huevos, embriones y paralarvas bajo condiciones de laboratorio. Los hallazgos revelaron que los huevos son pequeños y blanquecinos, presentando una longitud promedio de 1.66 ± 0.74 mm (Fig. 2). Un aspecto que llamó la atención fue la alta fecundidad de la especie, estimada entre 105,000 y 144,000 huevos por puesta (Fig. 3), donde el desarrollo embrionario se llevó a cabo en un período de 20 a 30 días (Plata & Herrera, 2014).

Los resultados más relevantes para el potencial acuícola de la especie corresponden a las paralarvas recién eclosionadas. Estas son pequeñas, con un tamaño promedio de 1.27 ± 0.14 mm de longitud del manto (Fig. 4) y se caracterizan por su naturaleza planctónica (Plata & Herrera, 2014). Estudios posteriores han complementado esta descripción, detallando la morfología del pico, la rádula y las ventosas, estructuras que no habían sido descritas previamente en esta especie (García et al. 2025).

El hecho de que las paralarvas de esta especie (*O. hubbsorum*) sean planctónicas es un dato de enorme relevancia, ya que, al igual que el pulpo común (*Octopus vulgaris*), representa un mayor desafío para la acuicultura, en comparación con el pulpo Maya (*Octopus maya*), el cual carece de etapa larvaria, es decir, eclosiona directamente como juvenil (Reyes-Méndez, 2016), esta distinción es crucial para la investigación.

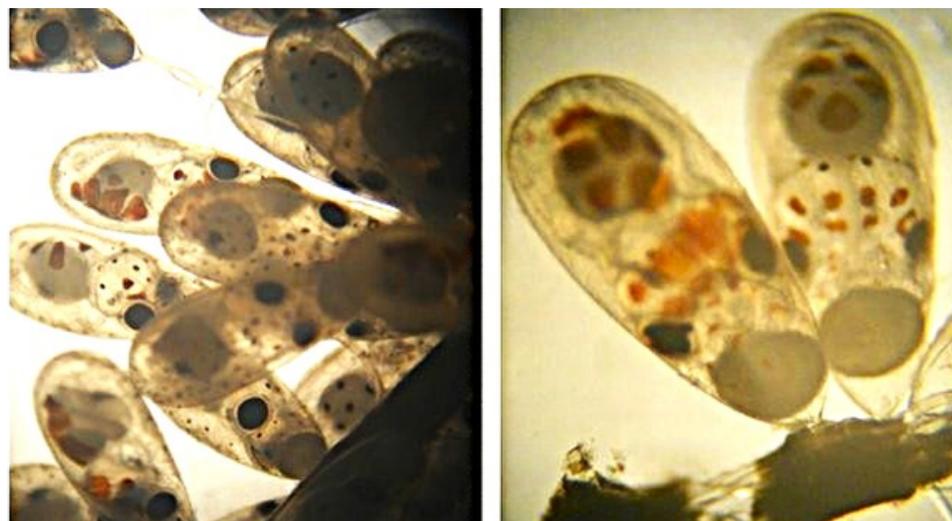


Figura 2. Huevos embrionados de *O. hubbsorum* en etapa tardía.

Fuente: Plata & Herrera, 2014.



Figura 3. Hembra de pulpo *Octopus sp.*, con sus racimos de huevos.
Fuente: OctoNation, 2015.

A diferencia de las especies que no tienen una fase planctónica (como *O. maya*, *Octopus tehuelchus*, *Octopus bimaculoides* y *Paroctopus digueti*), el pulpo verde debe enfrentar el principal “cuello de botella” que ha frustrado a investigadores acuícolas y productores de pulpo por más de dos décadas: la alta mortalidad de las paralarvas (IEO, 2018). En este sentido, es importante unir esfuerzos de investigación globalmente para resolver el mayor desafío de la acuicultura de pulpo verde, elevando así su importancia y pertinencia como recurso acuícola a escala internacional.

2.2 Ecología trófica y comportamiento

En su entorno natural, el pulpo verde es un depredador generalista. Su alimentación se compone principalmente de crustáceos decápodos. Una característica de particular interés es la ocurrencia de canibalismo, un comportamiento que se observa con mayor

frecuencia en los machos de la especie (Serrano et al. 2021). Finalmente, la especie presenta un ciclo de vida corto, que oscila entre 10 y 15 meses, con las hembras viviendo un poco más que los machos (OctoNation, 2015).



Figura 4. Larva planctónica (paralarva) de pulpo verde del Pacífico Mexicano (*Octopus hubbsorum* Berry, 1953). Tamaño promedio: 1.27 ± 0.14 mm de longitud del manto. Fuente: Manuel Zúñiga Panduro.

Las especies con ciclo de vida corto son favorables para el desarrollo del cultivo, dado que permiten un rápido retorno de la inversión y la renovación del stock de cultivo.

3. Desafíos fundamentales y avances tecnológicos en la acuicultura de pulpo

La elevada mortalidad de las paralarvas es el principal obstáculo para el desarrollo integral del cultivo de pulpo (Reyes-Méndez, 2016). Este fenómeno ha sido el foco de décadas de investigación, especialmente en la acuicultura de *O. vulgaris* en España. Los ensayos han intentado superar este problema con diversas estrategias de alimentación, como el uso de *Artemia salina* enriquecida y zoeas de crustáceos como el centollo (*Maja squinado*) (JACUMAR, 2004). A pesar de estos esfuerzos, los resultados han sido históricamente desalentadores, con tasas de supervivencia finales en algunos ensayos tan bajas como el 0.2% (Moxica et al. 2002). El desafío reside en proporcionar a las diminutas paralarvas una dieta con un alto valor nutricional, especialmente, rica en lípidos y ácidos grasos, que requieren para su rápido crecimiento y desarrollo de los brazos (Lara, 2021).

3.1 Nutrición y desarrollo de dietas para cefalópodos

El desarrollo de una dieta sostenible y nutricionalmente completa es otro de los grandes desafíos de la acuicultura de pulpo. Los pulpos son carnívoros voraces, y los intentos de alimentarlos con fórmulas artificiales han arrojado resultados mixtos. Diversos estudios han documentado la baja aceptación del alimento no natural y un

crecimiento deficiente de pulpos alimentados con dietas artificiales en comparación con dietas naturales, vivas o congeladas. Se ha encontrado que la baja eficiencia de estas dietas se debe a su pobre valor nutricional, a pesar de los intentos de enriquecerlas con proteínas, aminoácidos y vitaminas (Domínguez, et al. 2004).

El canibalismo es un problema recurrente en las granjas de pulpo, y los estudios sugieren que es una manifestación relacionada con la alta densidad de población, el estrés y la falta de estímulos (Acuatic Life Institute, 2019). No obstante, el canibalismo también podría derivarse de un problema nutricional subyacente. La investigación con *O. maya*, liderada por la UNAM, identificó que el canibalismo se asocia con una alimentación inadecuada. Esto se redujo al implementar un alimento balanceado patentado (Santillán, 2019). Esta evidencia sugiere que el canibalismo no es trivial y probablemente sea un fenómeno multifactorial, implicando una sinergia entre factores como la nutrición, el estrés del confinamiento y la densidad de siembra. Entonces, el éxito en el cultivo del pulpo verde requerirá un enfoque integral que aborde simultáneamente, la formulación de una dieta óptima, la gestión del entorno para evitar comportamientos agresivos, así como el desarrollo de protocolos que fomenten el bienestar animal.

3.2 Salud y bioseguridad en sistemas cerrados

La cría intensiva de pulpo en sistemas cerrados introduce riesgos significativos para la salud de los animales y para el entorno circundante. Los pulpos son muy susceptibles a los cambios en la calidad del agua y a las infecciones (Lara, 2021).

Diversos estudios han reportado la presencia de bacterias patógenas, especialmente del género *Vibrio* en especies como *O. maya* (Acuatic Life Institute, 2019). Algunas de estas especies de *Vibrio* no solo afectan a los pulpos, sino que también representan un riesgo para la salud humana. Además, se ha documentado la presencia de parásitos como el cestodo *Prochristianella* en *O. maya*, un hallazgo que subraya la necesidad de una vigilancia sanitaria rigurosa (Marmolejo et al. 2025).

La investigación en acuicultura, incluida la que se realiza con el pulpo verde, conlleva una responsabilidad inherente más allá de la viabilidad técnica. La posibilidad de que patógenos y parásitos se propaguen a través de escapes de los recintos de cultivo o por fallas en la bioseguridad, plantea un riesgo para las poblaciones silvestres de pulpos y para otros organismos marinos (Acuatic Life Institute, 2019). Por lo tanto, el desarrollo de cualquier proyecto de acuicultura, especialmente con una especie de alto valor comercial, debe ir acompañado de protocolos de bioseguridad, estrictos para prevenir la propagación de enfermedades y la alteración de los ecosistemas marinos.

4. Panorama actual de la acuicultura de pulpo

El desarrollo de la acuicultura de pulpo a nivel global ha seguido dos caminos distintos que a continuación se describen, determinados en gran medida por la biología de las especies de interés.

4.1 El modelo de éxito mexicano: Pulpo maya

El caso de *Octopus maya*, una especie endémica de la península de Yucatán, es un referente mundial en la acuicultura de pulpo.

La investigación liderada por la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación (UMDI) de la UNAM en Sisal, bajo la dirección del Dr. Carlos Rosas, ha acumulado más de 20 años de trabajo de investigación sobre la fisiología del pulpo, su sistema digestivo y reproductivo (Santillán, 2019; DW español, 2023). La clave de su éxito reside en el desarrollo larvario directo que presenta *O. maya*, lo que significa que sus crías emergen del huevo como juveniles bentónicos, evitando por completo las dificultades técnicas que conlleva la fase paralarval (DICYT, 2009; Reyes-Méndez, 2016).

Esta característica biológica permitió a los investigadores centrarse en otros desafíos, como el desarrollo de un sistema de producción especializado para cada etapa del ciclo de vida y la formulación de un alimento balanceado, del cual, la UNAM posee una patente. El descubrimiento de que el sistema digestivo del pulpo opera en un ambiente ácido, fue fundamental para el diseño de esta dieta. A pesar de estos logros, el modelo enfrenta desafíos para su escalamiento comercial, principalmente la falta de financiamiento y la necesidad de maquinaria para la producción masiva de alimentos (Santillán, 2019).

4.2 Los esfuerzos europeos: *Octopus vulgaris*

En contraste con el modelo mexicano, los esfuerzos de acuicultura en Europa, particularmente en España, se han centrado en *Octopus vulgaris*, una especie con una fase paralarval planctónica. El Instituto Español de Oceanografía (IEO) ha dedicado más de 20 años a la investigación y al desarrollo del cultivo larvario, logrando un avance significativo en 2018 al reproducir pulpos en cautiverio y obtener juveniles.

Este avance, considerado un logro científico a nivel internacional, fue logrado gracias a mejoras en la metodología de cultivo y alimentación, demostrando que es posible superar el “cuello de botella” para la producción de paralarvas a una escala experimental. El interés comercial es evidente, con la empresa Nueva Pescanova anunciando la primera granja comercial a gran escala en Canarias, con el objetivo de iniciar la producción sostenida (IEO, 2019).

Estos dos modelos, el mexicano con *O. maya* y el español con *O. vulgaris*, ilustran una clara dicotomía en la acuicultura de pulpo, donde la estrategia de cultivo depende en gran medida del tipo de desarrollo de la especie en cuestión; mientras que en el pulpo maya se ha sabido aprovechar la ausencia de paralarva, en el pulpo común la supervivencia de esta ha representado un reto muy difícil de superar.

4.3 Esfuerzos de Investigación en otras especies

La investigación del pulpo no se limita a las tres especies mencionadas previamente en este documento (*O. hubbsorum*, *O. maya* y *O. vulgaris*). En el Pacífico oriental y el Golfo de California, México, se encuentran los pulpos *Octopus bimaculatus*, *Octopus bimaculoides* y *Paroctopus digueti*, que también son sujetos de estudio por su potencial de cultivo (García Flores, 2017; Atondo Grajeda, 2021; Hofmeister & Voss, 2024; Maldonado et al. 2025). En otros países como en Chile, se está intentando el cultivo del pulpo rojo patagónico (*Enteroctopus megalocyathus*), pero al igual que con el pulpo *O. hubbsorum*, *O. vulgaris* y *O. bimaculatus*, el principal

desafío es la alta mortalidad de las paralarvas, que en estas especies se debe principalmente al canibalismo. En Argentina, se han realizado avances en el cultivo de *Octopus tehuelchus*, el cual presenta desarrollo directo al igual que *O. maya*, con esta especie han logrado obtener la segunda generación de pulpos (*Octopus tehuelchus*) en cautiverio (Barrueta et al. 2021). La Tabla 1 muestra un resumen en orden cronológico de los principales avances en la acuicultura del pulpo.

5. Consideraciones éticas y de sostenibilidad: El debate fundamental sobre el bienestar animal

El desarrollo de la acuicultura de pulpo no está exento de un profundo debate ético. La inteligencia y complejidad de estos animales han llevado a que su sensibilidad sea formalmente reconocida en la Declaración de Cambridge sobre la Conciencia. Los pulpos tienen la capacidad de sentir dolor, exhibir memoria a largo plazo y aprender de la experiencia, como lo demuestran sus comportamientos de evitación del dolor y su capacidad de resolver problemas (Lara, 2021). Estas características hacen que la cría intensiva de pulpos en entornos artificiales y de alta densidad sea objeto de serias preocupaciones. Su naturaleza solitaria y su tendencia a explorar su entorno entran en conflicto con las prácticas estándar de la industria, lo que podría resultar en altos niveles de agresión, estrés crónico y canibalismo. Además, la fragilidad de su piel, al carecer de esqueleto interno o externo, los hace susceptibles a lesiones por colisión o interacción con otros individuos (Lara, 2021).

Tabla 1. Avances importantes obtenidos en la acuicultura del pulpo.

Año	Logros de Investigación/Comercial	Institución/País	Especie principal	Referencia
2006	UNAM inicia investigación de acuicultura de pulpo	UMDI-Sisal, México	<i>Octopus maya</i>	DICYT, 2009
2013	Primera descripción de huevos y paralarvas	Universidad del Mar, México	<i>Octopus hubbsorum</i>	Plata & Herrera, 2014
2018	Logro de la reproducción de pulpo en cautiverio	IEO, España	<i>Octopus vulgaris</i>	IEO, 2019
2018	Obtención por primera vez de la generación F2 en cautiverio	INIDEP, Argentina	<i>Octopus tehuelchus</i>	Barrueta et al. 2021
2019	UNAM patenta incubadora y alimento balanceado	UNAM, México	<i>Octopus maya</i>	Santillán, 2019
2021	Anuncio de la primera granja comercial	Nueva Pescanova, España	<i>Octopus vulgaris</i>	IEO, 2019
2024-2025	Avances con potencial de cultivo	US Fish and Wildlife Service, UNISON	<i>Octopus bimaculatus</i>	Hofmeister & Voss, 2024 Maldonado et al. 2025

Actualmente existen algunos protocolos éticos para investigación en cefalópodos, sin embargo, hay pocos lineamientos que busquen su bienestar en condiciones de cultivo, por lo que se requiere bastante investigación y trabajo en este aspecto (Moltschaniwsky et al. 2007; Fiorito et al. 2015; Crespi-Abril et al. 2021; Rosa et al. 2024).

Existe una tensión inherente entre el interés económico de desarrollar una industria acuícola rentable y las consideraciones éticas sobre si es justificable someter a estos animales a un confinamiento intensivo. Este documento no busca resolver esta tensión, sino presentar una situación que debe ser discutida y resuelta con base en evidencia científica y consideraciones éticas. La investigación sobre la viabilidad técnica del cultivo de pulpo avanza, pero debe reconocerse que opera dentro de un marco de preguntas éticas que no pueden ser ignoradas.

5.1 Sostenibilidad ambiental

Más allá del bienestar animal, la sostenibilidad ambiental de la acuicultura de pulpo también presenta desafíos. La dieta carnívora de los pulpos requiere un alto consumo de harina y aceite de pescado, insumos que a menudo provienen de poblaciones de peces silvestres aptos para el consumo humano. Una industria a gran escala podría intensificar la presión sobre estas pesquerías ya sobreexplotadas, lo que va en contra del objetivo de aliviar la carga sobre los recursos marinos. Además, la notoria habilidad de los pulpos para escapar de sus recintos plantea un riesgo de que los individuos de cultivo puedan transferir enfermedades, parásitos o antibióticos a las poblaciones silvestres y a sus hábitats (Acuatic Life Institute, 2019).

6. Conclusiones

La acuicultura de pulpo es un campo que recientemente ha acelerado su desarrollo, impulsado por la creciente demanda del mercado global pero limitada por desafíos técnicos y éticos fundamentales. A la fecha, superar el "cuello de botella" en la producción de paralarvas sigue siendo la barrera más importante para el cultivo comercial de la mayoría de las especies de pulpo que presentan esta característica biológica. En contraste, el éxito en la producción de pulpo a escala piloto de la UNAM con *Octopus maya* y el de la INIDEP de Chile con *O. tehuelchus* se basa en que han aprovechado el desarrollo directo de estas especies, lo que resulta ser una gran ventaja.

La reciente caracterización del desarrollo embrionario y paralarval del pulpo verde del Pacífico Mexicano *Octopus hubbsorum*, significa una contribución científica de gran importancia. A pesar de que esta especie es el principal objetivo de las pesquerías de pulpo en el Pacífico Mexicano, y de su gran potencial de cultivo debido a su ciclo de vida corto y su alta tasa de crecimiento, aún se desconocen muchos aspectos básicos de su biología, principalmente, en etapas tempranas de su vida. Documentar la naturaleza planctónica de sus paralarvas, resulta una pieza fundamental para tratar de superar el mismo desafío que ha enfrentado el cultivo de *Octopus vulgaris* durante décadas. Investigar la biología de las paralarvas del pulpo verde no es un simple esfuerzo por replicar un modelo existente, sino un paso pionero para el desarrollo acuícola de una especie de alto valor en la región. Además, este conocimiento contribuye a la consolidación global de la cefalopodicultura.

Los avances obtenidos a la fecha en la investigación de las primeras etapas de vida del pulpo verde sientan las bases para futuros esfuerzos de cultivo. Sin embargo, también es importante reconocer las problemáticas actuales que enfrenta esta actividad, tales como las altas tasas de mortalidad por el canibalismo, la nutrición y las consideraciones éticas que están definiendo el panorama del cultivo de pulpo a nivel mundial.

7. Referencias

- Agencia Iberoamericana para la difusión de la Ciencia y la Tecnología (DICYT). (2009). La UNAM logra el primer cultivo de pulpo en el mundo. Recuperado de <https://www.dicyt.com/noticias/la-unam-logra-el-primer-cultivo-de-pulpo-en-el-mundo>. (Consultado el 15 de septiembre de 2025).
- Aquatic Life Institute. (2019). ¿Qué ocurre detrás de la investigación sobre cultivo de pulpos en México? Recuperado de <https://www.ali.fish/blog/qu-ocurre-detrs-de-la-investigacin-sobre-cultivo-de-pulpos-en-mxico-j37j9>. (Consultado el 15 de septiembre de 2025).
- Atondo Grajeda, A. E. (2021). Desempeño biológico y composición de ácidos grasos de juveniles de *Octopus bimaculoides* alimentados con dietas naturales [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada]. Repositorio Institucional CICESE. Recuperado de <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3576>. (Consultado el 03 de octubre de 2025).

- Barrueta, M. M., Desiderio, J. A., Goroso, B. G., & Spinedi, M. (2021). Aportes al desarrollo de tecnología de cultivo de pulpito *Octopus tehuelchus* - Estación de Maricultura INIDEP, No. 079. Recuperado de <https://marabierto.inidep.edu.ar/bitstreams/6e0a30fc-ce1a-485a-bfdf-d46dbaa855e2/download>. (Consultado el 15 de septiembre de 2025).
- Crespi-Abril, A.-C., & Rubilar, T. (2021). Moving forward in the ethical consideration of invertebrates in experimentation: Beyond the Three R's Principle. *Revista de Biología Tropical*, 69(Suppl.1), 346–357. Recuperado de <https://doi.org/10.15517/rbt.v69isuppl.1.46366>. (Consultado el 03 de octubre de 2025)
- Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA). (2024). Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca 2024. Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/conapesca/documentos/anuario-estadistico-de-acuicultura-y-pesca> (Consultado el 18 de septiembre de 2025).
- Deutsche Welle en español (DW español). (2023, 15 de septiembre). Octópodos de criadero [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=QavvNfbEEoI>. (Consultado el 18 de septiembre de 2025).
- Diarte-Plata, G., Escamilla-Montes R., Granados-Alcántar, S., Pineda-Mendoza, N. Y., Sainz-Aboyte V. y Luna-González, A. (2019). Biología poblacional del pulpo pigmeo *Paroctopus digueti* (Perrier y Rochebrune, 1894): Caso de estudio en el norte de Sinaloa, México. En: V. H. Trejo, R. Valdivia Alcalá, J. Hernández Ortiz, P. R. Cruz Chávez y G. R. Cruz Chávez (Coords). *Estudios recientes sobre economía ambiental y agrícola en México*, México (pp. 465-495). Universidad Autónoma de Baja California Sur-Universidad Autónoma de Chapingo, ISBN UABCS: 978-607-8654-15-4. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/348539342_BIOLOGIA_POBLACIONAL_DEL_PULPO_PIGMEO_Paroctopus_digueti_PERRIER_ROCHEBRUNE_1894_CASO_DE_ESTUDIO_EN_EL_NORTE_DE_SINALOA_MEXICO. (Consultado el 03 de octubre de 2025)
- Domínguez, P., Gaxiola, C. G., & Rosas, V. C. (2004). Alimentación y Nutrición de Moluscos Cefalópodos: Avances Recientes y Perspectivas Futuras. En *Avances en Nutrición Acuícola VII. Memorias del VII Simposium Internacional de Nutrición Acuícola* (pp. 16-19). Hermosillo, Sonora, México. Recuperado de <https://nutricionacuicola.uanl.mx/index.php/acu/article/download/216/214>. (Consultado el 8 de septiembre de 2025).
- Fiorito, G., Affuso, A., Basil, J., Cole, A., de Girolamo, P., D'angelo, L., Dickel, L., Gestal, C., Grasso, F., Kuba, M., Mark, F., Melillo, D., Osorio, D., Perkins, K., Ponte, G., Shashar, N., Smith, D., Smith, J., & Andrews, P. Ir. (2015). Guidelines for the Care and Welfare of Cephalopods in Research –A consensus based on an initiative by CephRes, FELASA and the Boyd Group. *Laboratory Animals*, 49, 1–90. Recuperado de <https://doi.org/10.1177/0023677215580006>. (Consultado el 03 de octubre de 2025)

- García Flores, M. 2017. Ontogenia inicial y fecundidad del pulpo pigmeo del Pacífico *Paroctopus digueti* (Perrier y Rochebrune, 1984). Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, La Paz, B. C. S., México, pp. viii, 84 h. Recuperado de http://repositoriodigital.ipn.mx/handle/12345_6789/26355. (Consultado el 03 de octubre de 2025)
- García, F. M., Morelos, C. R., & Martínez, A. M. (2025). Morphological and Molecular Characterization of Eggs and Paralarvae of Green Octopus, *Octopus hubbsorum* Berry 1953, from the Gulf of California. *Diversidad*, 17(7), 470. <https://doi.org/10.3390/d17070470>. (Consultado el 18 de septiembre de 2025).
- Gómez-Fierro, A. 2017. Crecimiento y supervivencia de juveniles de *Octopus bimaculoides* alimentados con dietas naturales. Tesis de Maestría en Ciencias en Acuicultura. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). México. 69 pp. Recuperado de <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/1595>. (Consultado el 03 de octubre de 2025)
- Granados-Alcantar, S., Escamilla-Montes, R., Diarte-Plata, G., Fierro-Coronado, J.A. (2020). Growth and sex ratio of octopus *Paroctopus digueti* (Perrier & Rochebrune, 1894) in a wild population. *Croatian Journal of Fisheries*, 78, 53-68. Recuperado de DOI: <https://doi.org/10.2478/cjf-2020-0006>. (Consultado el 03 de octubre de 2025)
- Hofmeister, J. K. K., & Voss, K. M. (2024). *Octopus bimaculatus*, California two-spot octopus. En: *Octopus Biology and Ecology* (pp. 31-45). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820639-3.00012-1>. (Consultado el 15 de septiembre de 2025).
- Instituto Español de Oceanografía (IEO). (2018). Instituto Español de Oceanografía logra reproducir el pulpo en cautividad. Nota de Prensa. Recuperado de https://www.ieo.es/documents/10640/6075371/NP_081118_Reproducci%C3%B3n+pulpo+cautividad.pdf/c20037cb-7386-4097-8705-85cbc8a5456c. (Consultado el 15 de septiembre de 2025).
- Junta Nacional Asesora de Cultivos Marinos (JACUMAR). (2004). PLAN NACIONAL DE PULPO – CULTIVO DE PULPO. Recuperado de https://www.mapa.gob.es/dam/mapa/contenido/pesca/temas--nuevo/acuicultura/planes-nacionales/planes-desde-2001/pdfs/pulpo_iif.pdf. (Consultado el 15 de septiembre de 2025).
- Lara, E. (2021). Cría intensiva de pulpo: una receta para el desastre. *Compassion in World Farming International (CIWF)*. Recuperado de https://www.ciwf.es/media/7453372/informe_ciwf_cria_intensiva_de_pulpos_2021.pdf. (Consultado el 15 de septiembre de 2025).
- Maldonado-Othón, C. A., González-Félix, M. L., Pérez-Velázquez, M., & Minjarez-Osorio, C. (2025). El Pulpo de Dos Manchas: Un Tesoro del Mar con Potencial de Cultivo. *Biotecnológica Magazine*, 3(2), 35–41.

- Recuperado de la acuicultura 2024.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.15376148>.
(Consultado el 15 de septiembre de 2025).
- Marmolejo, G. L. Y. G., Arjona, C. K. A., Castellanos, M. S. R., & Aguirre, M. M. L. (2025). ¿Los pulpos se enferman? Avance y Perspectiva, 11(2). Cinvestav. Recuperado de <https://avanceyperspectiva.cinvestav.mx/los-pulpos-se-enferman/>. (Consultado el 15 de septiembre de 2025).
- Moltschaniwskyj, N. A., Hall, K., Lipinski, M. R., Marian, J. E. A. R., Nishiguchi, M., Sakai, M., Shulman, D. J., Sinclair, B., Sinn, D. L., Staudinger, M., Van Gelderen, R., Villanueva, R., & Warnke, K. (2007). Ethical and welfare considerations when using cephalopods as experimental animals. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 17(2-3), 455-476. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s11160-007-9056-8>. (Consultado el 03 de octubre de 2025)
- Moxica, C., Linares, F., Otero, J. J., Iglesias, J., & Sánchez, F. J. (2002). Cultivo intensivo de paralarvas de pulpo, *Octopus vulgaris* Cuvier, 1797, en tanques de 9 m³. *Bol. Inst. Esp. Oceanogr.*, 18(1-4), 31-36. Recuperado de <https://www.vliz.be/imisdocs/publications/358717.pdf>. (Consultado el 15 de septiembre de 2025).
- OctoNation. (2015). How Long Do Octopus Live? Life Expectancy, Mating, and Deep-Sea Survivors. Recuperado de <https://octonation.com/octopus-lifespan/>. (Consultado el 15 de septiembre de 2025).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2024). El estado mundial de la pesca y la
- la acuicultura 2024.
<https://doi.org/10.4060/cd0683es>.
(Consultado el 18 de septiembre de 2025).
- Plata, M. A., & Herrera, Sac-nicté, S. A. (2014). First Description of Eggs and Paralarvae of Green Octopus *Octopus hubbsorum* (Cephalopoda: Octopodidae) under Laboratory Conditions. *American Malacological Bulletin*, 32(1), 132-139.
<https://doi.org/10.4003/006.032.0101>.
(Consultado el 15 de septiembre de 2025).
- Reyes-Méndez, M. (2016). Cultivo de pulpo: una alternativa en la producción a pequeña escala. *Foro Iberoam. Rec. Mar. Acui. VII* (2015), 179-192. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/292669086_Cultivo_de_pulpo_una_alternativa_en_la_produccion_a_pequena_escala#fullTextFileContent. (Consultado el 15 de septiembre de 2025).
- Rosa, R., Santos, C. P., Borges, F., Amodio, P., Amor, M., Bower, J. R., Caldwell, R. L., Di Cosmo, A., Court, M., Fiorito, G., Gestal, C., González, Á. F., Guerra, Á., Hanlon, R. T., Hofmeister, J. K., Ibáñez, C. M., Ikeda, Y., Imperadore, P., Kommritz, J. G., ... Gleadall, I. G. (2024). Past, present, and future trends in octopus research. *Octopus Biology and Ecology*, 421-454.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820639-3.00010-8>. (Consultado el 15 de septiembre de 2025).
- Santillán, M. L. (2019). Cosecha de pulpo, tecnología innovadora. Universidad Autónoma de México. Ciencia UNAM-DGDC. Recuperado de <https://ciencia.unam.mx/leer/937/cosecha-de-pulpo-tecnologia-innovadora>. (Consultado el 15 de septiembre de 2025).

Serrano, T. M., Flores-Ortega, J. M., Godinez, D. E., Granados-Amores, J., & Zavala-Leal, I. (2021). Trophic ecology of the Hubb's octopus *Octopus hubbsorum* (Cephalopoda: Octopodidae) in the central Mexican Pacific. Recuperado de <https://doi.org/10.1093/mollus/eyab023>.

(Consultado el 15 de septiembre de 2025).

Villanueva, R., Iglesias, J., & Fuentes, L. (2014). Current Status and Future Challenges in Cephalopod Culture. En Iglesias J, Fuentes L, Villanueva R (eds). *Cephalopod Culture* (pp. 479-49). Springer.

http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-8648-5_26. (Consultado el 15 de septiembre de 2025).

Cita:

Zúñiga-Panduro, M. de J., & Barraza-Guardado, R. H. (2025). Hacia una acuicultura sostenible del pulpo: El caso del pulpo verde del Pacífico Mexicano en el contexto global de la cefalopodicultura. *Biotecnológica Magazine*, 3(5), 1-13. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17576140>

Potencial terapéutico y otros beneficios de las algas verdes del género *Caulerpa*

Dra. Norma Y. Hernández Saavedra
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
nhernan04@cibnor.mx

Tema: Se presenta una visión general de las algas, destacando su diversidad, importancia ecológica y potencial como fuente de moléculas bioactivas. Destaca la clasificación de las algas en grupos como algas pardas, rojas y verdes, con especial atención a las algas verdes, especialmente del género *Caulerpa*, rico en minerales, compuestos bioactivos y nutrientes como vitaminas y ácidos grasos. El texto destaca las prometedoras aplicaciones farmacológicas y nutricionales de las especies de *Caulerpa*, incluyendo sus propiedades antivirales, antiinflamatorias, anticancerígenas y antiobesidad, y aboga por una mayor investigación sobre sus compuestos bioactivos y sus posibles usos terapéuticos.

1. Introducción

Aunque las algas prosperan en una amplia gama de hábitats, como el hielo antártico, las superficies rocosas y arbóreas, el pelaje animal, la piel humana y animal, y la arena del desierto, la mayoría de sus formas son acuáticas. Las algas son fundamentales en los ecosistemas acuáticos modernos, no sólo porque producen oxígeno para otras formas de vida acuática, sino también porque sirven como productoras primarias de materia orgánica en la base de la red alimenticia (MHNC, 2022). Las masas de algas más grandes (p. ej., los bosques de algas) son utilizadas por los animales como refugios y zonas de crianza. Otras algas son fundamentales en la fisiología de algunos animales acuáticos y participan en diversos procesos vitales (p. ej., simbiosis con corales, Fig. 1) (Taylor et al., 2009).



Figura 1. Pólipo de coral con algas simbióticas (zooxantelas). En la simbiosis las algas producen, durante la fotosíntesis, compuestos que son incorporados por el coral, usándolos principalmente para su nutrición, reproducción y calcificación; el 90% de los requerimientos de carbono de corales simbióticos proviene de las algas (tomado de Rothschuh, 2023).

Las algas son un grupo heterogéneo de organismos principalmente acuáticos, que van desde formas unicelulares flageladas, de tan solo unas pocas micras de diámetro, hasta organismos multicelulares de hasta 80 m de longitud, como las algas gigantes (Fig. 2). La mayoría de las algas son fotoautótrofas y actualmente se clasifican según el tipo de pigmentos que presentan (Tabla 1), sus productos de almacenamiento y la complejidad celular (uni- o pluri-celular). En la clasificación de las algas, las características moleculares, bioquímicas y ultraestructurales cada vez son más importantes en la sistemática y la filogenia (Taylor et al., 2009).

Tabla 1. Clasificación de las algas con base en su contenido y composición de pigmentos (basado en Quitral et al., 2012).

Clasificación	Nombre común	Tipo de pigmentos		
		Clorofilas	Xantofilas	Otros
Chlorophyta (clorofitas)	Algas verdes	a y b	Luteína, violaxantina, neoxantina y enteroxantina	
Phaeophyta (feofitas)	Algas pardas o cafés	a y c	Fucoxantina y flavoxantina	
Rhodophyta (rodofitas)	Algas rojas	a y d		Ficoeritrina, ficobilina

2. Las algas como productoras de moléculas bioactivas

Las algas realizan fotosíntesis y producen sustancias bioactivas útiles en el tratamiento de varias condiciones médicas como el cáncer, la obesidad, la diabetes, la inflamación y enfermedades neurodegenerativas, entre otras. La investigación sobre diferentes géneros de algas, particularmente de algas verdes, ha demostrado las propiedades antiproliferativas, antiangiogénicas, inductoras de apoptosis y citotóxicas de sus compuestos. Estas sustancias bioactivas, incluyen polisacáridos, glicoproteínas, sifonaxantina y cannabinoides (entre otros). Estos compuestos han mostrado resultados prometedores en estudios con células cancerosas, lo que sugiere su uso potencial en la terapia contra el cáncer y en la mejora de la calidad de vida de los pacientes. Los mecanismos implicados en el uso de los compuestos bioactivos de las algas en la lucha contra el cáncer implican cambios en la función de las mitocondrias, la activación de caspasas y la amplificación de las señales de muerte celular



Figura 2. Ejemplos de los tres grandes grupos de algas. 1) Clorófitas o algas verdes -*Caulerpa prolifera*-, 2) Rodofitas o algas rojas -*Asparagopsis taxiformis*- y Feofitas o algas pardas -*Fucus sp.*- (1-2 tomado de Marilles, 2020; 3 de Cross, 2023).

a través de etiquetas, todo ello contribuye a la destrucción de las células cancerosas (Tripathi et al., 2021).

1.2 Las algas verdes

Las clorófitas, o algas verdes, actualmente constituyen el grupo de algas más diverso del mundo en cuanto a número de especies (alrededor de 10 000) y se distribuyen en hábitats que consideran desde la superficie de la nieve hasta diversas relaciones simbióticas. La organización del cuerpo vegetal de este grupo puede ser unicelular a multicelular (Fig. 3) (Graham y Wilcox, 2000).

Figura 3. Las clorófitas (algas verdes), caracterizadas por presentar clorofila a y b, xantofilas y carotenos, y almacenar almidón en sus plastos, constituyen uno de los phylum de plantas más diversos, y el más diverso de todas las algas (tomado de Fernández Rojas, 2024).

Generalmente, se asume que las algas verdes incluyen el grupo ancestral que dio origen a las plantas terrestres (embriófitas). Dentro de las clorófitas destacan las de la clase Ulvofíceas (Ulvophyceae) que consiste en un grupo de algas verdes que se distinguen principalmente por su morfología laminar (Taylor et al., 2009). Ecológicamente, juegan un papel fundamental en la red trófica, ya que forman parte de la base de la red alimenticia del mar, ya sea formando el fitoplancton o como fuente de alimentos para especies herbívoras. Dentro de las especies más características de ulvofíceas se pueden mencionar los géneros *Ulva*, *Monostroma*,

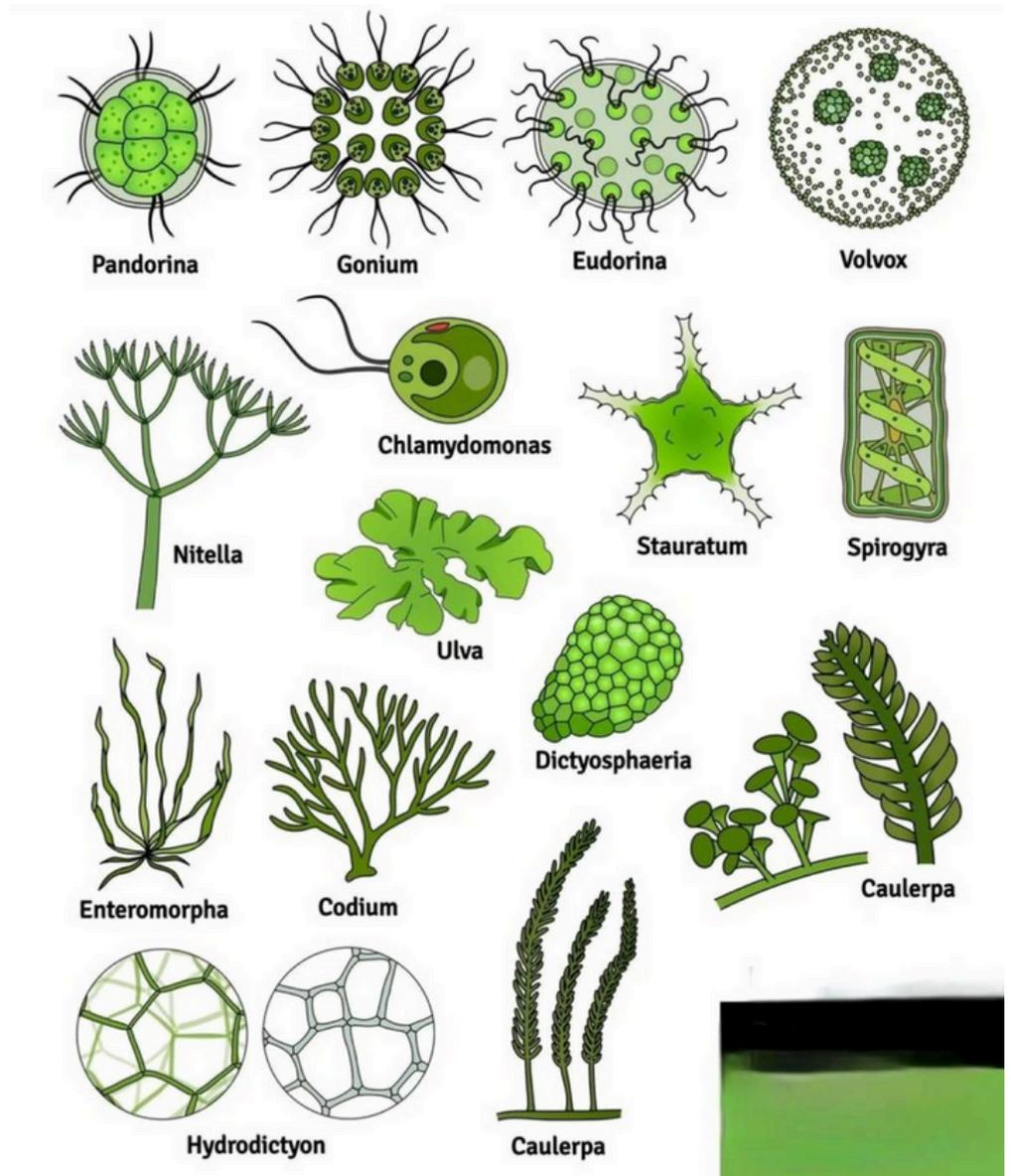




Figura 4. Ejemplos de algas verdes marinas comestibles. *Enteromorpha compressa*, *Ulva lactuca*, *Monostroma nitidum* y *Caulerpa mexicana* (tomado de iNatulalistMX, 2025; Algae Base, 2025).

Enteromorpha y *Caulerpa* (Fig. 4), que tienen además un interés y potencial alimenticio para el ser humano (Subdiversion, 2025; Taylor et al., 2009).

3. *Caulerpa*

Las algas verdes de la familia Caulerpaceae, representadas principalmente por el género *Caulerpa* (del griego, de *caulos*, tallo, y *erpo*, yo repto) se encuentran ampliamente distribuidas en hábitats marinos tropicales y subtropicales poco profundos de todo el mundo (Guiry y Guiry, 2020). *Caulerpa* comprende aproximadamente 163 especies conocidas, algunas de las cuales son comestibles y de importancia cultural, como las uvas de mar y el caviar verde (Fig. 5). Este grupo de algas presenta una compleja estructura frondosa compuesta por estolones horizontales y diversas formas de hojas fotosintéticas, que presentan patrones de ramificación y morfologías distintivos en respuesta a las condiciones cambiantes de luz. El género *Caulerpa* también es conocido por su naturaleza

invasiva y tiene la capacidad de formar (rápidamente) tapones en las heridas para prevenir la pérdida de contenido celular tras una lesión, lo que contribuye a su amplia distribución e impacto ecológico (Rushdi et al., 2020).



Figura 5. Ejemplos de especies del género *Caulerpa*. *Caulerpa racemosa* (con distribución mundial) y *Caulerpa lentillifera* (endémicas de Asia y Australia) conocidas como caviar o uvas de mar (tomado de Algae Base, 2025).

Las especies de *Caulerpa* son ricas en minerales, alcanzando hasta el 55 % de su peso seco. Presentan altos niveles de carbohidratos, de 3,6 % al 83,2 % (dependiendo de la especie) además de cantidades significativas de hierro, alcanzando concentraciones de hasta 81.3 mg por 100 gramos de peso seco (De Gaillande et al., 2017). Algas como *Caulerpa* se utilizan comúnmente como suplementos nutricionales debido a su alto contenido de elementos inorgánicos esenciales, en particular yodo y hierro, que se encuentran en gran cantidad en las macroalgas marinas. Una revisión de la literatura de 1978 a 2019 destacó la diversidad química y las propiedades farmacológicas de *Caulerpa* (Fig. 6) y proporcionó valiosa información sobre sus mecanismos de acción (Rushidi et al., 2020).

4. Composición y aplicaciones potenciales

A pesar del alto valor nutricional del género de algas *Caulerpa*, sus propiedades químicas y farmacológicas siguen siendo poco estudiadas. Algunas especies, como *C. lentillifera*, sirven como fuente de alimento, como las uvas de playa, mientras que otras, como *C. taxifolia*, son tóxicas. Algunos estudios han demostrado que los compuestos aislados de algunas especies de *Caulerpa* tienen un alto potencial terapéutico, mostrando actividades antivirales, antibacterianas, citotóxicas, inmunoestimulantes, hipolipidémicas, antiobesidad, cardioprotectoras, hepatoprotectoras y antiproliferativas (Rushidi et al., 2020; Tabla 2).

4.1 Carbohidratos

Los polisacáridos de algas marinas, en particular los derivados de las especies de *Caulerpa*, son valiosos como fibras dietéticas alternativas que



Figura 6. Diversidad química y farmacología del género *Caulerpa*. En el panel azul se representa la proporción (%) de la composición química del género *Caulerpa*, mientras que el panel verde, la correspondiente la diversidad farmacológica (basado en Rudishi et al, 2020).

valiosos como fibras dietéticas alternativas que pueden aumentar la saciedad y facilitar la digestión. Los polisacáridos derivados de *Caulerpa* presentan una composición compleja con una gran diversidad de “osas” (galactosa, glucosa, arabinosa, xilosa, manosa, ramnosa y fucosa). Están compuestos por diversos aminoácidos y se componen principalmente de glucanos y polisacáridos sulfatados, que presentan un amplio espectro de actividades biológicas. Tienen aplicaciones potenciales en los campos médico y farmacéutico gracias a sus propiedades anticoagulantes, antiinflamatorias, antioxidantes, inmunoestimulantes y antitumorales, y estudios demuestran su

Tabla 2. Lista de algunos compuestos bioactivos nutraceuticos importantes identificados en algas del género *Caulerpa* (construido de Magdugo et al., 2020; Shah et al., 2022; Rushidi et al., 2020).

Especie	Compuesto	Tipo de actividad
<i>C. racemosa</i> <i>C. lentillifera</i>	Pseudoefedrina	Antiinflamatoria
	Tetratetracontano	Antibacteriano
	Deoxispergualina	Inhibidos del factor-kappa B nuclear
	2,4-Di-tert-butilfenol	Antibacteriano, antiinflamatorio, anticancer
	Ácido palmítico	Antiinflamatorio, antioxidante
	Heptacosan	Antioxidante
	Escualeno	Antiinflamatorio, antioxidante, antitumoral
	Ácido metoxiacético	Anticancer, efectivo contra el síndrome del ovario poliquístico
	Monocaprina	Antimicrobiano
	D-Mannitol	Antihiper glucémico
	Ácidos docosahexaenoico y eicosapentaenoico	Anticancer, protector cardiovascular, antiinflamatorio
	Ácido palmitoléico	Antiinflamatorio
	Astaxantina	Antiinflamatorio, antioxidante
	b-Caroteno	Antioxidante
	b-Criptoxantina	Anticancer, antioxidante
	Canthaxantina	Antioxidante, antiinflamatorio, neuroprotector
	Zeaxantina	Antioxidante
	Ácido oleico	Antioxidante, cardiovascular, hepatoprotector
	Ácido pentadecanoico	Anticancer
	Ácido mirístico	Antidiabético, antiinflamatorio
	Ácido behenico	Antiobesidad
	Ácido palmítico	Antitumoral
	Limoneno	Antiparasítico
	Heneicosano	Antiinflamatorio, analgésico, antipirético
Eicosano	Antiinflamatorio, analgésico, antipirético	
Pentadecano	Antiinflamatorio, analgésico, antipirético	
Azuleno	Antiinflamatorio	
<i>C. ashmeadii</i>	Sesquiterpeno	Tóxico para peces
	Caulerpina	Antimicrobiano, citotóxico, antiinflamatorio
<i>C. bikinensis</i>	Sesquiterpeno	Inhibidor de veneno de abejas derivado de la fosfolipasa A2
<i>C. brachypus</i>	Polisacáridos sulfatados	Anti-Herpes simplex virus
<i>C. brownii</i>	Diterpenoides	Inhibición de la división celular, antibacteriano
<i>C. chemnitzia</i>	Terpenoides, ácidos grasos	Actividad anti fotoquímica y bactericida
<i>C. cupressoides</i>	Polisacáridos sulfatados	Anticoagulante, antioxidante, antiinflamatorio, inmunoestimulante, antinociceptivo
<i>C. faridii</i>	Ácidos grasos	Disuade su consumo por moluscos y erizos
<i>C. filiformis</i>	Extracto	Antiinflamatorio, antimicrobiano

Tabla 2. Lista de algunos compuestos bioactivos nutraceuticos importantes identificados en algas del género *Caulerpa* (construido de Magdugo et al., 2020; Shah et al., 2022; Rushidi et al., 2020) (continuación).

<i>C. flexilis</i>	Flexilina, caulerpol, compuestos fenólicos	Antiinflamatorio, antioxidante, bioestimulante
<i>C. kempfii</i>	Extracto	Antinflamatorio, antioxidante, antinociceptivo
<i>C. lamourouxii</i>	Caulerpina	Protección cardiovascular, antioxidante, baja los niveles de colesterol sérico en humanos, antiinflamatorio
<i>C. mexicana</i>	Polisacáridos sulfatados	Antinociceptivo and antiinflamatorio, actividad antibacteriana
<i>C. microphysa</i>	Extracto	Efectos antitumorales
<i>C. okamurae</i>	Extracto etanólico	Inhibe la acumulación de lípidos, reduce la expresión del principal regulador de la adipogénesis (antiobesidad), protector cardiovascular, regula el azúcar en sangre
<i>C. prolifera</i>	Extracto metanólico, polisacáridos sulfatados	Actividad antibacteriana, potencial osteogénico, genotóxico
<i>C. sertularioides</i>	Extracto	Antibacteriano, antidermatofítico
<i>C. taxifolia</i>	Caulerpenino, proteínas, derivados de caulerpenino y polisacáridos sulfatados	Anticáncer, antiproliferativo contra cáncer de mama, antiviral, ictiotóxico
<i>C. verticillata</i>	Extracto	Antibacteriano

eficacia contra virus, inflamación y modulación inmunitaria (Tabla 2; Tahar et al., 2025).

4.2 Proteínas

Las especies de *Caulerpa* presentan el mismo perfil de aminoácidos que otras algas marinas, con predominio de los ácidos aspártico y glutámico y, en contraste, la histidina, la lisina y la metionina son los aminoácidos más limitantes. Además, se han aislado varios péptidos bioactivos marinos de varias especies de *Caulerpa* (De Gaillande et al., 2017; Tahar et al., 2025).

4.3 Lípidos y ácidos grasos.

Las especies de *Caulerpa* presentan un bajo contenido lipídico, que oscila entre el 0,1 y el 7,2 % de la materia seca. La composición lipídica de las algas marinas ha suscitado un gran interés debido a su alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga (AGPI) y carotenoides (Fig. 6). Todos estos AGPI se encuentran en las especies de *Caulerpa* y el ácido α -linolénico (18:3n-3) es el AGPI más abundante en las especies comestibles. Por lo tanto, el consumo de especies de *Caulerpa* podría mejorar la proporción de AGPI n-6/n-3 en la dieta occidental actual, que ronda los 15, mientras que debería ser de alrededor de 1 (De Gaillande et al., 2017; Syakilla et al., 2022).

4.4 Pigmentos

Las clorofilas a y b son los pigmentos más abundantes en las especies de *Caulerpa*, con un contenido conjunto 20 veces más alto que el de β -caroteno. La clorofila es un antioxidante consolidado con propiedades anticancerígenas demostradas. En *Caulerpa*, los niveles de β -caroteno (0,15–0,39 mg g⁻¹) son mucho menores que los valores reportados en microalgas (hasta 100 mg g⁻¹). La sifonaxantina es un compuesto con funciones atractivas y novedosas en la prevención del cáncer y la inhibición de la lipogénesis. Además, se ha observado que la actividad antioxidante de la sifonaxantina extraída de *C. lentillifera* es superior a la de la astaxantina (Sharma et al., 2017).

4.5 Vitaminas

Las especies de *Caulerpa* contienen grandes cantidades de vitamina B12, por lo que podrían prevenir la deficiencia de vitamina B12 en vegetarianos y veganos ya que esta vitamina no se encuentra en plantas vasculares. Además, las especies de *Caulerpa* presentan grandes cantidades de vitaminas C y E (hasta el 46,3 % y el 62,7 % de la ingesta diaria recomendada (IDR), respectivamente (por cada 100 g de *Caulerpa* consumida). Esto es muy relevante a nivel nutricional, ya que las vitaminas C y E representan potentes antioxidantes que podrían aumentar la resistencia a las enfermedades y al estrés oxidativo (De Gaillande et al., 2017; Mandugo et al., 2020).

4.6 Metabolitos secundarios

Como se observa en la figura 6 y Tabla 2, la quimiodiversidad del género *Caulerpa* es particularmente alta, con alrededor de 125 compuestos aislados.

Muchos compuestos bioactivos, principalmente metabolitos sesquiterpenoides y diterpenoides, tienen importancia cosmética, nutracéutica y farmacéutica (De Gaillande et al., 2017).

Por ejemplo, de *C. racemosa* se aislaron dos paraxilenos prenilados, denominados caulerpreniloles A y B, con actividad antifúngica y antitumoral, además de β -sitosterol es un estanol vegetal conocido por reducir los niveles de colesterol en sangre, ya que inhibe su absorción intestinal mientras que la *caulerpa*, aislada de *C. racemosa* y *C. sertularioides*, posee propiedades analgésicas y antiinflamatorias. La caulerpenina exhibe actividades antineoplásicas, antibacterianas y antiproliferativas y es el sesquiterpenoide citotóxico más abundante en *Caulerpa*. Además de inhibir el crecimiento de microorganismos, interfiere en el desarrollo de huevos fertilizados de erizo de mar y algunos de sus productos de degradación reducen la palatabilidad del alga, disminuyendo así la presión de pastoreo de algunos peces e invertebrados. Algunos extractos de *C. taxifolia* y *C. lentillifera* ya se han comercializado como ingredientes cosméticos con actividad antimicrobiana y antioxidante (Darmawan et al., 2020).

5. Conclusión

Las especies del género *Caulerpa* representan un recurso valioso para el desarrollo de nuevos compuestos bioactivos y justifica una mayor investigación sobre sus compuestos bioactivos y aplicaciones (Rushidi et al., 2020). Aunque las especies más estudiadas son *C. racemosa* y *C. lentillifera* otras especies menos conocidas como *C. okamurae* presentan propiedades farmacológicas que merece la pena seguir investigando. Por ejemplo, los extractos de *C. okamurae*, especialmente los extractos etanó-

licos, han demostrado importantes efectos antiobesidad y antidiabéticos tanto en modelos celulares como animales. Estos extractos inhiben la adipogénesis, reducen la acumulación de lípidos y mejoran el metabolismo de la glucosa y la sensibilidad a la insulina mediante la modulación de vías metabólicas clave y la expresión génica, lo que sugiere potencial para el control de la obesidad y los trastornos metabólicos. Los extractos también muestran propiedades antiinflamatorias, lo que refuerza su potencial terapéutico (Manandhar et al., 2020, Park et al., 2021).

6. Referencias

- Algae Base. 2025. Algae Base. Consultado 14/08/2025.
- Cross D.T. 2023. Las algas pardas nos ayudan a combatir el cambio climático. ECOPORTAL. Consultado 13/08/2025.
- Darmawan, M., Fajarningsih, N.D., Sihono, Irianto, H.E. 2020. *Caulerpa*: Ecology, Nutraceutical and Pharmaceutical Potential. In: Nathani, N.M., Mootapally, C., Gadhvi, I.R., Maitreya, B., Joshi, C.G. (eds) *Marine Niche: Applications in Pharmaceutical Sciences*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5017-1_17.
- De Gaillande C., Payri C., Remoissenet G., Zubia M. 2017. *Caulerpa* consumption, nutritional value and farming in the Indo-Pacific region. J Appl Phycol., **29**:2249-2266.
- Fernández Rojas Y. 2024. Post LinkedIn. Consultado 19/08/2025.
- Graham L.E., Wilcox L.W. 2000. *Algae*. Capitulo 20. p.p. 460. Prentice Hall, 2000 - 640p.
- Guiry M.D., Guiry G.M. 2020. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <https://www.algaebase.org>. Caulerpa. Consultado 19/08/2025.
- iNaturalistMX. 2025. Algas verdes. iNaturalistMX. Consultado 13/08/2025.
- Magdugo R.P., Terme N., Lang M., Pliego-Cortés H., Marty C., Hurtado A.Q., Bedoux G., Bourgougnon N. 2020. An Analysis of the Nutritional and Health Values of *Caulerpa racemose* (Forsskål) and *Ulva fasciata* (Delile)-Two Chlorophyta Collected from the Philippines. *Molecules*, **25**(12):2901.
- Manandhar B., Kim H., Rhyu D. 2020. *Caulerpa okamurae* extract attenuates inflammatory interaction, regulates glucose metabolism and increases insulin sensitivity in 3T3-L1 adipocytes and RAW 264.7 macrophages. Journal of Integrative Medicine, **18**(3): 253-264.
- Marilles. 2020. Conozcamos nuestras algas. Marilles Foundation. Consultado 13/08/2025.
- MHNC (Museo de Historia Natural de Concepción). 2022. Ciclo de las algas: Las algas y su importancia social, ecológica y económica. Museo de Historia Natural de Concepción. Consultado 19/09/2025.
- Park C., Thakuri L., Rhyu D. 2021. *Caulerpa okamurae* ethanol extract improves the glucose metabolism and insulin sensitivity in vitro and in vivo. J Appl Biol Chem, **64**(1), 89-96.
- Quitral R.V., Morales G.K., Sepúlveda L.M., Schwartz M.M. 2012. Nutritional and health properties of seaweeds and its potential as a functional ingredient. Rev Chil Nutr, **39**(4):196-202.
- Rothschuh U. 2023. Zooxantelas: qué son, simbiosis, ciclo vital y función. Ecología Verde. Consultado 02/09/2026).

Rushdi, M., et al. 2020. A review on the diversity, chemical and pharmacological potential of the green algae genus *Caulerpa*. *South African J Bot.*, 132:226-241.

Shah M.D., Venmathi Maran B.A., Shaleh S.R.M., Zuldin W.H., Gnanaraj, C.;Yong, Y.S. 2022. Therapeutic Potential and Nutraceutical Profiling of North Bornean Seaweeds: A Review. *Mar. Drugs*, 20, 101.

Syakilla N., George R., Chye F.Y., Pindi,W., Mantihal S., Wahab N.A., Fadzwi F.M., Gu P.H., Matanjun P. 2022. A Review on Nutrients, Phytochemicals, and Health Benefits of Green Seaweed, *Caulerpa lentillifera*. *Foods*, 11(18), 2832.

Tahar A., Zghida H., Pereira D.T., Korbee N., Treichel H., Figueroa F.L., Achour L. 2025. Biochemical Composition and Alkaline Extraction Optimization of Soluble Bioactive Compounds from the Green Algae *Caulerpa cylindraceae*. *Marine Drugs*, 23(5):208.

Taylor T.N., Taylor E.L., Krings M. 2009. Algae. En: *Paleobotany: The Biology and Evolution of Fossil Plants*. Thomas N. Taylor, Edith L. Taylor, Michael Krings (Eds.) *Academic Press* p.p. 121-160.

Tripathi R., Shalini R., Singh K.S. 2021. Phylogenetic origin of algae as potential repository of anticancer compounds. En: *Evolutionary Diversity as a Source for Anticancer Molecules*. Akhileshwar Kumar Srivastava, Vinod Kumar Kannaujiya, Rajesh Kumar Singh, Divya Singh (Eds.). *Academic Press*. p.p. 155-189. DOI: 10.1016/B978-0-12-821710-8.00007-2.

Cita:

Hernández Saavedra, N. Y. (2025). Potencial terapéutico y otros beneficios de las algas verdes del género *Caulerpa*. *Biotechnológica Magazine*, 3(5), 14-22.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17582077>

Sinergias que sanan: Turismo de Salud, Biotecnología y Sustentabilidad en Baja California Sur

Felipe Ascencio

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

Tema: La biotecnología ha revolucionado la industria del turismo médico al ofrecer tratamientos innovadores, personalizados y preventivos, y al aprovechar tecnologías avanzadas para mejorar la experiencia del visitante. Esto hace que los destinos que incorporan la biotecnología en su oferta sean más atractivos y competitivos en el mercado global, atrayendo a un público cada vez más consciente de la salud.



Figura 1. Hombre nadando en Los Amargos, en la salina de Guerrero Negro, BCS México (Fuente: Tania Plateros T, 2024 <https://tribunademexico.com/turistas-llegan-guerrero-negro-nadar-sal/>).

1. Introducción

Al explorar cómo el medio ambiente influye en la salud y el turismo, resulta evidente que factores como la calidad del aire y del agua, la presencia de manantiales medicinales y termales, y la rica biodiversidad desempeñan un papel fundamental en las experiencias turísticas. Las condiciones climáticas favorables, como temperaturas agradables y aire fresco, ayudan a los visitantes a relajarse y recuperarse.

Además, la ubicación geográfica y los paisajes naturales, como cordilleras, vistas al mar u oasis desérticos, son ideales para disfrutar de actividades al aire libre que mejoran la salud. Todos estos factores influyen significativamente en el desarrollo de destinos que pueden convertirse en líderes en turismo de salud. El turismo de salud está en auge, directamente vinculado a la calidad y la conservación del medio ambiente.

Cada vez más turistas buscan no solo servicios médicos y de bienestar, sino también experiencias en entornos naturales para mejorar su salud y bienestar general (Jevtić et al., 2024).

Además del agua, el turismo de salud se basa en recursos naturales verdaderamente lujosos, como un clima agradable, aire puro, vegetación exuberante y lodos terapéuticos. Todos estos elementos, ubicados lejos de los hogares de los potenciales visitantes, despiertan el deseo de viajar. Esto significa que tienen lugares específicos que desean visitar, actividades emocionantes en las que desean participar y conservar experiencias inolvidables.

El turismo de bienestar se puede dividir en tres categorías:

1. **Turismo tradicional de aguas termales**, que se refiere a los viajeros que visitan aguas termales o complejos turísticos para recibir tratamiento, rehabilitación y atención preventiva utilizando agentes curativos naturales y métodos médicos modernos como la fisioterapia.
2. **Turismo de bienestar**, que involucra a personas que buscan bienestar físico y mental a través de las propiedades curativas y relajantes de la naturaleza y otras actividades (como la relajación y la meditación).
3. **Turismo médico**, que involucra a personas (pacientes) que viajan al extranjero para tratamientos e intervenciones médicas complejas (como cirugías, intervenciones dentales y fertilización *in vitro*).

Ramos y Cuamea (2023) realizaron un estudio para identificar los factores que influyen en la disposición de los turistas dentales a volver a visitar Tijuana, México. El estudio tuvo como objetivo mejorar la comprensión de los factores que influyen en la intención de los turistas dentales de volver a visitar Tijuana, México. Los principales hallazgos del estudio indicaron que la proximidad cultural, la calidad del servicio, el precio y los servicios complementarios influyeron positivamente en la disposición de los turistas dentales a volver a visitar Tijuana, México, siendo la proximidad geográfica un factor importante en su proceso de toma de decisiones.

El turismo de salud es una forma de viaje que utiliza agentes curativos naturales especializados y controlados, fisioterapia y medicina moderna y alternativa para mantener y mejorar la salud física y mental.

Independientemente de lo que suceda, la principal conclusión del estudio fue que la disposición de los turistas dentales a volver a visitar Tijuana está influenciada por la calidad del servicio, los servicios complementarios, el precio y la proximidad cultural. El estudio también concluyó que los dentistas y especialistas en odontología deberían aprovechar las ventajas geográficas y culturales del acceso fronterizo para atraer pacientes.

2. La interdependencia de los recursos naturales, la sociedad, la sostenibilidad y el turismo de salud

El turismo de salud se basa en una relación simbiótica entre los recursos naturales, la dinámica social y los principios de sostenibilidad.

a. Los recursos naturales como base

Recursos naturales como el aire, el agua (playas, oasis), la biodiversidad (flora y fauna terrestre y marina) y los paisajes costeros y desérticos son cruciales para el desarrollo y la sostenibilidad de los posibles destinos de turismo de salud en Baja California Sur (Tabla 1). La calidad y la conservación de estos recursos inciden directamente en el atractivo y la viabilidad a largo plazo de estos destinos, moldeando las motivaciones y experiencias de los turistas (Pessot et al., 2021; Jevtić et al., 2024; Blanco-Cerradelo et al., 2022).

b. Compromiso social y bienestar

El turismo de salud puede mejorar la calidad de vida local al apoyar la salud, la educación y el patrimonio cultural de la comunidad. Sin embargo, también presenta desafíos, como una mayor competencia por los recursos y posibles impactos sociales en las comunidades locales. Una gestión eficaz y la participación comunitaria son cruciales para equilibrar estos impactos (Szromek et al., 2022; Gabriel, 2019; Blanco-Cerradelo et al., 2022).

c. Sostenibilidad como mediador

Las prácticas sostenibles, como la conservación de recursos, los sistemas de gestión ambiental y el apoyo a la cultura local, son cruciales para garantizar que el turismo de salud no degrade los recursos de los que depende. La elaboración de informes de sostenibilidad y la integración de objetivos ambientales en los modelos de negocio pueden ayudar a alinear el crecimiento del turismo con la salud ecológica y social a largo plazo (Szromek et al., 2022; Jevtić et al., 2024; Čičin-šain et al., 2023; Song et al., 2017; Sgroi, 2020; Blanco-Cerradelo et al., 2022).

d. Turismo de salud como Impulsor

Con una planificación proactiva y estrategias inclusivas, el turismo de salud puede promover la gestión ambiental y el desarrollo sostenible. También puede fomentar la apreciación del entorno natural y cultural e inspirar tanto a turistas como a residentes locales a participar en iniciativas de conservación (Pessot et al., 2021; Jevtić et al., 2024; Gabriel, 2019; Blanco-Cerradelo et al., 2022).

3. Retos, oportunidades y estrategias de integración para el desarrollo del turismo de salud en Baja California Sur

i. Retos clave

a. Sobreexplotación de recursos y degradación ambiental. El crecimiento descontrolado del turismo puede provocar la sobreexplotación de los recursos naturales, la contaminación y la pérdida de biodiversidad, lo que socava la sostenibilidad de los destinos turísticos (Pessot et al., 2021; Song et al., 2017; Sgroi, 2020; Eluwole et al., 2019).

b. Integración insuficiente de la sostenibilidad.

Muchas empresas de turismo de salud carecen de planes integrales de sostenibilidad y tienen una participación limitada en iniciativas como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y el transporte sostenible (Szromek et al., 2022).

c. Disparidades socioeconómicas. Los beneficios del turismo de salud no siempre se distribuyen equitativamente y pueden generar impactos sociales negativos, como una mayor competencia por los recursos locales y la posible desatención de las prioridades de desarrollo humano (Gabriel, 2019; Cockx y Francken, 2014; Čičin-šain et al., 2023).

ii. Oportunidades clave

a. Enfoques multidisciplinares e inclusivos. La integración de las perspectivas ambientales, sociales y económicas puede crear modelos de turismo de salud más resilientes y atractivos. La colaboración entre las partes interesadas, incluidas las comunidades locales, los responsables políticos y las empresas pueden mejorar la sostenibilidad y el atractivo de los destinos turísticos (Pessot et al., 2021; Jevtić et al., 2024; Gabriel, 2019; Blanco-Cerradelo et al., 2022).

Tabla 1. Importancia de los elementos ambientales para el desarrollo de la salud y el turismo (Jevtić et al., 2024).

Elemento ambiental	Importancia para el desarrollo de la salud y el turismo
Suelo (lodos medicinales)	Formados mediante la interacción de factores geológicos, biológicos y climáticos, son agentes curativos naturales utilizados en el turismo de salud por sus propiedades terapéuticas. En zonas costeras de la península y áreas de aguas termales, la fangoterapia ha sido utilizada tradicionalmente, aprovechando los barros marinos ricos en minerales y algas, o lodos provenientes de zonas volcánicas o acuáticas con minerales beneficiosos para la salud externa.
Orografía	La diversidad del relieve, como la presencia de montañas, colinas, desfiladeros, cuevas, valles y otras formas de relieve, influye significativamente en el atractivo del destino. Esta diversidad de relieve animaría a los turistas que visitan el destino principalmente en el marco del turismo de salud a prolongar su estancia.
Vegetación	Dado que las comunidades vegetales necesariamente incluyen animales, la vegetación está representada por un conjunto de diversas biocenosis. De esta manera, la vegetación representa todo el mundo vegetal y animal de una zona determinada, agrupado en diferentes biocenosis o ecosistemas. En cuanto a la distribución de las biocenosis o ecosistemas, se puede hablar de las áreas de distribución de las biocenosis (por ejemplo, la de las biocenosis de cactáceas, etc.).
Agua (playas, aguas termales, y aguas minerales -amargos de las salineras-)	Son reconocidas desde hace mucho tiempo por sus propiedades curativas y son un pilar fundamental del turismo de salud. Estas aguas, que se distinguen por su contenido mineral y temperatura, se utilizan en balneoterapia para tratar diversas afecciones. Los amargos producidos en las salineras, como la salinera en Guerrero Negro, BCS, tienen aplicaciones destacadas ya que utiliza la experiencia sensorial de flotar en aguas altamente salinas, considerada terapéutica para aliviar tensiones físicas y mejorar la piel, además de ofrecer un entorno natural único que también incentiva el bienestar mental y emocional.
Clima	Los factores meteorológicos diarios, como la temperatura, la humedad y el viento, inciden significativamente en la salud de los turistas, por lo que comprender las condiciones microclimáticas es esencial para optimizar los destinos de turismo de salud. Estos elementos afectan la distribución de la vegetación, lo que a su vez puede crear microclimas favorables que favorecen las actividades de turismo de salud. Ciertos climas son especialmente adecuados para el tratamiento de afecciones específicas.

b. Gestión sostenible de recursos. La implementación de buenas prácticas en conservación de recursos, educación ambiental y promoción cultural puede mejorar la sostenibilidad y la competitividad de los destinos de turismo de bienestar (Szromek et al., 2022; Jevtić et al., 2024; Song et al., 2017; Sgroi, 2020; Blanco-Cerradelo et al., 2022).

c. Mejora de la presentación de informes y la rendición de cuentas. La presentación de informes de sostenibilidad y la transparencia en las prácticas comerciales pueden ayudar a las empresas turísticas a alinearse con los objetivos globales de desarrollo sostenible y mejorar la calidad de vida de los residentes locales (Čičin-šain et al., 2023).

iii) Estrategia Integral

- Integrar la sostenibilidad en los modelos de negocio y la planificación de destinos
- Fomentar la participación comunitaria y la distribución de beneficios
- Promover la educación ambiental y la gestión responsable para turistas y residentes
- Implementar una gestión adaptativa para abordar las condiciones ambientales y sociales cambiantes

Este marco enfatiza la relación dinámica y mutuamente beneficiosa entre los recursos naturales, la sociedad, la sostenibilidad y el turismo de salud, y destaca la necesidad de un enfoque integrado, adaptativo y participativo para fortalecer el turismo de salud y bienestar (Gabriel, 2019; Cockx y Francken, 2014; Čičin-šain et al., 2023).

4. Estandarización y fortalecimiento de las normas requeridas para promover el turismo médico en México

Para promover el desarrollo del turismo médico en México y garantizar su competitividad internacional, es necesario estandarizar y fortalecer las normas nacionales en áreas clave donde actualmente difieren. La Tabla 2 detalla las áreas clave que requieren armonización y mejora. La estandarización de estas normas requiere la coordinación entre la Secretaría de Salud, la Confederación Federal de Instituciones de Salud de México (COFEPRIS), la Secretaría de Turismo Médico de México (SECTUR) y los gobiernos estatales. La adopción de estándares internacionales (como la JCI) y la agilización de los trámites para el turismo médico son clave para posicionar a México como un destino líder en turismo médico.

5. Baja California Sur está en proceso de convertirse en un destino reconocido de turismo de salud

Baja California Sur se encuentra en las primeras etapas de su consolidación como destino reconocido de turismo médico. A pesar de sus ventajas naturales y un flujo constante de visitantes, enfrenta desafíos clave que obstaculizan su desarrollo en este ámbito. La Tabla 3 detalla la situación actual y los pasos necesarios.

Tabla 2. Estándares estatales que deben homogenizarse y fortalecerse para el impulso del turismo médico en México.

Estándar	Metas	Acciones
Estándares de Calidad en Servicios Médicos	Certificación de instalaciones	Homologar requisitos mínimos para hospitales y clínicas (quirófanos, equipos, higiene) en todos los estados, basados en normas internacionales (ej. Joint Commission International). (https://www.jointcommissioninternational.org/). Acreditación obligatoria por parte de COFEPRIS para garantizar seguridad en procedimientos quirúrgicos, estéticos y de rehabilitación. (https://www.gob.mx/salud/csg).
	Capacitación del personal	Establecer programas estatales de certificación en atención a pacientes internacionales (idiomas, protocolos interculturales). (https://www.conacem.org.mx/).
Regulación de Precios y Transparencia	Tarifas médicas estandarizadas	Crear un catálogo nacional de costos referenciales para procedimientos comunes (cirugías, tratamientos dentales), evitando sobrepagos o competencia desleal entre estados. (https://www.gob.mx/cenetec).
	Transparencia en paquetes turístico-médicos	Obligar a agencias y hospitales a detallar costos incluidos (hospitalización, medicamentos, postoperatorio) y excluidos, siguiendo la Ley Federal de Protección al Consumidor. (https://www.diputados.gob.mx/LevesBiblio/pdf/LGT_200623.pdf).
Protocolos Sanitarios y Seguridad del Paciente	Historiales clínicos electrónicos	Implementar sistemas interoperables entre estados para garantizar continuidad en la atención, incluso si el paciente viaja a otra entidad. (https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5284148&fecha=11/02/2013).
	Gestión de complicaciones	Homologar protocolos de emergencia y seguros de responsabilidad civil para cubrir negligencia o malas prácticas. (https://www.gob.mx/profedet).
Marco Legal para Turistas Médicos	Visados y permisos	Unificar criterios estatales para la Visa de Visitante por Motivos Médicos, evitando trámites burocráticos dispares (ej. Nuevo León vs. Quintana Roo). (https://www.gob.mx/profedet).
	Protección jurídica	Crear una defensoría del paciente internacional en cada estado, adscrita a PROEFECO para resolver disputas rápidamente. (https://www.gob.mx/sectur).
Promoción y Marketing Ético	Publicidad regulada	Prohibir promesas engañosas (ej. "resultados 100% garantizados") y exigir avales científicos en campañas publicitarias. (https://www.medicaltourism.com/).
	Difusión de destinos	Coordinar una estrategia nacional de marca (ej. "México Medical Travel") que evite competencia entre estados y resalte fortalezas regionales (ej. Jalisco en cirugías, Baja California en odontología). (https://www.medicaltourism.com/).
Sostenibilidad Ambiental y de Infraestructura	Manejo de residuos médicos	Aplicar la NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002 en todos los estados para el tratamiento de desechos peligrosos. (https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/doc/Programas/VIH/Leyes%20y%20normas%20y%20reglamentos/Norma%20Oficial%20Mexicana/NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002%20Proteccion%20ambiental-salud.pdf).
	Infraestructura turística	Certificar hoteles y transportes asociados a paquetes médicos con estándares de accesibilidad y comodidad para pacientes en recuperación.
Integración de Medicina Tradicional y Alternativa	Regulación de terapias no convencionales	Homologar criterios para ofrecer servicios como temazcal, acupuntura o herbolaria, respaldados por evidencia científica y personal certificado (Sulaiman et al., 2024; Fa et al., 2024).
Colaboración Interinstitucional	Redes estatales de turismo médico	Crear comités locales (gobierno, hospitales, universidades) para alinear oferta educativa con demanda de especialistas (ej. enfermeros bilingües).
	Interoperabilidad de datos	Plataforma única nacional para estadísticas de turismo médico (procedimientos más demandados, países de origen, quejas recurrentes).
Enfoque en Experiencia del Paciente	Estándares de hospitalidad médica	Capacitación obligatoria en atención culturalmente sensible (ej. dieta halal/kosher, acompañamiento emocional). (Yang et al., 2020).
	Seguimiento post-tratamiento	Garantizar telemedicina accesible desde el extranjero para evitar complicaciones postoperatorias (Khatib et al. 2023).
Combate a Prácticas Ilegales	Lucha contra el turismo de	Armonizar leyes estatales para criminalizar estas prácticas y fortalecer inspecciones en clínicas (Lundin et al., 2008; Marinelli et al., 2024).
Lucha contra el turismo de órganos y vientres de alquiler		Armonizar leyes estatales para criminalizar estas prácticas y fortalecer inspecciones en clínicas (Lundin et al., 2008; Marinelli et al., 2024).
Registro nacional de proveedores		Base de datos pública de hospitales y médicos acreditados para turismo médico, actualizada y accesible.

Tabla 3. Situación actual de Baja California Sur reconocida por la calidad de su turismo de salud.

Factores a favor	Desafíos críticos
<p>Potencial en turismo de salud: Recursos naturales: Playas, clima cálido, y entornos como el Mar de Cortés ofrecen oportunidades para retiros de bienestar, spas, y terapias alternativas. Infraestructura turística: Destinos como Los Cabos tienen resorts de lujo que podrían integrar servicios de wellness (yoga, meditación, nutrición).</p>	<p>Infraestructura médica insuficiente: Falta de acreditaciones internacionales: No hay hospitales en BCS certificados por organismos como la Joint Commission International (JCI), esencial para generar confianza. Limitada especialización: Escasez de centros dedicados a cirugías complejas, odontología de alto nivel, o tratamientos especializados.</p>
<p>Cercanía a mercados clave: Proximidad a Estados Unidos y Canadá, principales emisores de turistas médicos y de bienestar.</p> <p>Costos competitivos: Los precios de procedimientos médicos en México son hasta un 60% más bajos que en EE.UU., lo que podría atraer a pacientes internacionales.</p>	<p>Promoción y marketing: BCS no está asociado a estrategias nacionales de turismo médico (como Nuevo León o CDMX). Falta una marca que lo posicione como destino de salud.</p> <p>Barreras logísticas y legales: Accesibilidad: Vuelos directos limitados desde ciudades clave de EE.UU./Canadá. Seguridad: Aunque menos conflictivo que otros estados, la percepción de inseguridad en México aún disuade a algunos turistas. Regulación: Ausencia de marcos legales claros para garantizar derechos de pacientes internacionales (ej.: seguros, responsabilidad civil).</p>
<p>Fuentes: https://ssbcs.gob.mx/post/avanza-en-bcs-la-transformacion-de-la-infraestructura-publica-en-salud http://www.datatur.sectur.gob.mx/Documentos%20compartidos/oradm/03_ProSec_Baja_California_Sur.pdf https://setuesbcs.gob.mx/baja-california-sur-conmemora-el-dia-mundial-del-turismo-destacando-su-transformacion-sostenible/</p>	<p>Recursos humanos: Pocos profesionales médicos bilingües y capacitados en estándares internacionales.</p>

i). Medidas para cerrar la brecha: Baja California Sur debe invertir en infraestructura para acreditar hospitales según los estándares de la JCI (Acreditación Global de Salud); crear clústeres médicos especializados (por ejemplo, cirugía estética, rehabilitación); establecer alianzas estratégicas, incluyendo con aseguradoras internacionales (por ejemplo, BlueCross) para cubrir tratamientos en Baja California Sur; y conectar con plataformas de turismo médico como la Alianza para la Calidad del Turismo Médico (MTQUA); ii). Implementar estrategias de marketing dirigidas, incluyendo eventos enfocados en el bienestar holístico (que combina naturaleza y salud) y la participación en ferias internacionales de turismo médico (p. ej., el Congreso de Turismo Médico); iii). Establecer y fortalecer programas de capacitación y regulación, incluyendo cursos de inglés médico para profesionales, y leyes para proteger a los pacientes internacionales (transparencia de

precios, resolución de disputas); y iv). Mejorar la seguridad y la accesibilidad, incluyendo el fortalecimiento de las medidas de seguridad en zonas turísticas y la negociación de vuelos chárter para pacientes médicos.

6. Ejemplos de innovaciones biotecnológicas que pueden implementarse en Baja California Sur para mejorar los servicios de turismo de salud

La biotecnología ha revolucionado los tratamientos médicos y el turismo de salud, haciéndolos más atractivos a nivel mundial. Gracias a los avances en biotecnología, el sector ha experimentado un crecimiento significativo, permitiendo tratamientos más efectivos y personalizados, como la medicina regenerativa y la terapia génica. Esto ha atraído la atención de pacientes que buscan soluciones de salud avanzadas (Tabla 4).

Tabla 4. Impacto de la biotecnología en el desarrollo del turismo médico (FasterCapital 2025).

Desarrollo biotecnológico	Aspectos relevantes para la salud y bienestar	Impacto en el turismo de salud y bienestar
Desarrollo de Tratamientos Innovadores	Creación de terapias avanzadas, como: <ul style="list-style-type: none"> - <i>Terapias génicas</i>: Para tratar enfermedades hereditarias o crónicas. - <i>Terapias con células madre</i>: Utilizadas en regeneración celular y antienvejecimiento. - <i>Productos biotecnológicos</i>: Como péptidos y enzimas para mejorar la salud y el bienestar. 	Estos tratamientos atraen a personas que buscan soluciones avanzadas y personalizadas, lo que ha impulsado el turismo de salud y bienestar hacia destinos que ofrecen estas tecnologías.
Medicina Preventiva y Personalizada	La biotecnología ha revolucionado la medicina preventiva al permitir: <ul style="list-style-type: none"> - <i>Análisis genéticos</i>: Para identificar predisposiciones a enfermedades y diseñar planes de prevención personalizados. - <i>Biomarcadores</i>: Para monitorear el estado de salud y detectar problemas antes de que se manifiesten. - <i>Nutrigenómica</i>: Combinación de genética y nutrición para ofrecer dietas personalizadas que mejoran el bienestar. 	Estos avances han hecho que el turismo de bienestar sea más atractivo, ya que los viajeros buscan programas preventivos y personalizados que no están disponibles en sus países de origen.
Tecnologías de Antienvejecimiento	La biotecnología ha impulsado el desarrollo de tratamientos antienvejecimiento, como: <ul style="list-style-type: none"> - <i>Terapias celulares y génicas</i>: Para rejuvenecer tejidos y órganos. - <i>Productos cosmecéuticos</i>: Derivados de biotecnología para mejorar la piel y el aspecto físico. - <i>Suplementos biotecnológicos</i>: Diseñados para retrasar el envejecimiento a nivel molecular. 	Estos tratamientos son altamente demandados en el turismo de bienestar, especialmente en destinos especializados en salud estética y antienvejecimiento.
Mejora de la Experiencia del Turista	La biotecnología ha contribuido a mejorar la experiencia del turista de salud y bienestar mediante: <ul style="list-style-type: none"> - <i>Dispositivos portátiles</i>: Monitores de salud que permiten a los turistas llevar un seguimiento de sus indicadores vitales durante su estancia. - <i>Aplicaciones de salud</i>: Plataformas digitales que ofrecen recomendaciones personalizadas basadas en datos biotecnológicos. - <i>Realidad virtual y aumentada</i>: Para terapias de relajación y rehabilitación. 	Estas tecnologías han elevado el estándar de los servicios ofrecidos en el turismo de bienestar.

Las clínicas y hospitales que utilizan estas tecnologías generalmente brindan un mayor nivel de atención, ganándose la confianza de los turistas que viajan por motivos de salud. En muchos países, los tratamientos biotecnológicos son más accesibles y asequibles que en los países desarrollados, lo que anima a las personas a buscar tratamiento médico. Todo esto ha contribuido a un enfoque más holístico del bienestar. El turismo de salud ha evolucionado para abarcar prácticas como la medicina alternativa y las terapias complementarias, que se benefician de la investigación biotecnológica en la salud física y mental. Además, la biotecnología ha impulsado una regulación y acreditación más estrictas de clínicas y centros de bienestar, mejorando la seguridad y la eficacia de los tratamientos. En resumen, los avances en biotecnología han ayudado a más personas a comprender la

importancia de la salud, motivándolas no solo a buscar atención médica, sino también a vivir experiencias que pueden mejorar su bienestar general (FasterCapital 2025).

El turismo de bienestar se ha beneficiado significativamente de los avances en biotecnología, lo que ha impulsado su crecimiento y ha mejorado su impacto tanto en los turistas como en los destinos.

a. Mejora de la salud y el bienestar: La biotecnología facilita el diseño de experiencias turísticas que promueven la salud y el bienestar, permitiendo a los consumidores aliviar el estrés y mejorar su bienestar mediante experiencias vacacionales personalizadas (Lehto y Lehto, 2019; Liao et al., 2023). Esto incluye mejoras en la salud física y mental, la calidad de vida y la salud ambiental (Liao et al., 2023).

b. Integración con la salud: Impulsado por los avances en biotecnología, el turismo de salud y bienestar se integra cada vez más con otras áreas de la atención médica. Esta integración apoya el desarrollo sostenible y contribuye a una mejor calidad de vida (Zhong et al., 2021).

c. Desarrollo sostenible: La biotecnología contribuye al turismo de bienestar sostenible al abordar los desafíos ambientales, sociales y económicos. Esto es crucial para el bienestar del paciente y la sostenibilidad de los destinos turísticos (Figueiredo et al., 2024).

d. Recursos naturales y diseño biofílico: Aprovechar los recursos naturales y los principios del diseño biofílico, con el apoyo de la biotecnología, puede potenciar los beneficios restauradores del turismo de bienestar. Este enfoque conecta a las personas con la naturaleza y promueve la salud física y mental (Pessot et al., 2021; Sachin y Dash, 2022).

e. Innovación en la industria: La economía colaborativa y la biotecnología impulsan la innovación en el turismo de salud y bienestar. Esto incluye la mejora en la obtención de recursos, el apoyo político y el desarrollo de infraestructura, todos ellos cruciales para el desarrollo de la industria (Li y Chen, 2022).

7. Conclusión

No es casualidad que el turismo de salud se esté convirtiendo en un tema de actualidad en nuestro país. Contamos con una gran riqueza de recursos naturales, como aguas termales marinas, lodos marinos medicinales y una vegetación muy diversa. Sin embargo, la clave para el desarrollo a largo plazo de este tipo de turismo reside en la adecuada protección y utilización de estos recursos, teniendo siempre presente el desarrollo sostenible.

Proteger el medio ambiente y garantizar que las actividades turísticas se ajusten a la riqueza natural son factores clave para el desarrollo del sector. Las investigaciones indican que las aguas minerales, los lodos curativos y un clima favorable son ideales para el turismo de spa y bienestar, que ha ganado popularidad en muchos países en los últimos años.

Baja California Sur tiene un enorme potencial para el turismo de bienestar. Estamos observando una creciente demanda mundial de servicios de bienestar y turismo médico. Si bien México, y Baja California Sur en particular, posee valiosos recursos, necesitamos mejorar nuestra oferta. Necesitamos promover mejor estos recursos en el extranjero y desarrollar infraestructura para atraer turistas internacionales. Además, el turismo sostenible es crucial y debe ser una prioridad absoluta. Esto no solo contribuirá al éxito a largo plazo de Baja California Sur en el mercado turístico mundial, sino que también convertirá al turismo de salud en uno de los principales atractivos de nuestro estado. Esto no solo impulsará el desarrollo económico, sino que también protegerá nuestro patrimonio natural y cultural.

Además, debemos esforzarnos por establecer estándares nacionales unificados centrados en la calidad médica, la transparencia y la protección del paciente. Para lograrlo, se necesita una reforma legislativa integral que alinee las leyes locales con las políticas nacionales y ofrezca incentivos fiscales a los estados que adopten las mejores prácticas. Solo así podremos competir con destinos consolidados como Tailandia o Colombia.

La biotecnología también está teniendo un impacto significativo en el turismo de salud. Ha transformado la forma en que las personas buscan servicios relacionados con la salud y la prevención. Estos avances han generado mejores resultados en materia de salud, una mayor integración con el sector sanitario y han impulsado la innovación en el sector turístico. Todo esto hace que el turismo de salud sea crucial tanto para los viajeros como para las comunidades que visitan.

8. Referencias

- Blanco-Cerradelo, L., Diéguez-Castrillón, M., Fraiz-Brea, J., Gueimonde-Canto, A. (2022). Protected Areas and Tourism Resources: Toward Sustainable Management. *Land*. <https://doi.org/10.3390/land11112059>
- Čičin-šain, D., Valčić, S., Janković, S. (2023). Interdependence of sustainability factors in tourism in the context of sustainability reporting. *Tourism in Southern and Eastern Europe*. <https://doi.org/10.20867/tosee.07.4>
- Cockx, L., Francken, N. (2014). Extending the concept of the resource curse: natural resources and public spending on health. *Ecological Economics*, 108, 136-149. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2014.10.013>
- Eluwole, K., Akadiri, S., Alola, A., Etokakpan, M. (2019). Does the interaction between growth determinants a drive for global environmental sustainability? Evidence from world top 10 pollutant emissions countries.. *The Science of the total environment*, 705, 135972. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135972>
- FasterCapital 2025. Hospitality and tourism biotechnology and health: Marketing Strategies for Health Focused Tourism Ventures. <https://fastercapital.com/content/Hospitality-and-tourism-biotechnology-and-health--Marketing-Strategies-for-Health-Focused-Tourism-Ventures.html> (Última consulta Agosto 11, 2025).
- Figueiredo, N., Abrantes, J., Costa, S. (2024). Mapping the Sustainable Development in Health Tourism: A Systematic Literature Review. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16051901>
- Gabriel, J. (2019). Connecting the links between tourism, protected areas and wellbeing. *Tourism Geographies*, 21, 355 - 358. <https://doi.org/10.1080/14616688.2018.1564781>
- Jevtić, M., Gajić, T., Vukolić, D. (2024). Theoretical review and literature analysis of the role of the environment in health tourism. *Turisticko poslovanje*. <https://doi.org/10.5937/turpos0-53295>
- Lehto, X., Lehto, M. (2019). Vacation as a Public Health Resource: Toward a Wellness-Centered Tourism Design Approach. *Journal of Hospitality & Tourism Research*, 43, 935 - 960. <https://doi.org/10.1177/1096348019849684>
- Li, L., Chen, X. (2022). Empirical Research into the Development Mechanism of Industry Innovation of Health and Wellness Tourism in the Context of the Sharing Economy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912479>
- Liao, C., Zuo, Y., Xu, S., et al. (2023). Dimensions of the health benefits of wellness tourism: A review. *Frontiers in Psychology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.1071578>

Pessot, E., Spoladore, D., Zangiacomi, A., Sacco, M. (2021). Natural Resources in Health Tourism: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 13, 2661.

<https://doi.org/10.3390/SU13052661>

Pessot, E., Spoladore, D., Zangiacomi, A., Sacco, M. (2021). Natural Resources in Health Tourism: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 13, 2661.

<https://doi.org/10.3390/SU13052661>

Ramos K., Cuamea O. 2023. Dental tourism: factors influencing travelers' revisit intention to the Mexican border. *International Journal of Tourism Cities*, doi:

<https://doi.org/10.1108/IJTC-03-2023-0046>

Sachin, A., Dash, S. (2022). A Systematic Review on Implications of Biophilic Design as a Salutogenic Approach to Wellness Tourism. *ECS Transactions*.

<https://doi.org/10.1149/10701.17395ecst>

Sgroi, F. (2020). Forest resources and sustainable tourism, a combination for the resilience of the landscape and development of mountain areas.. *The Science of the total environment*, 736, 139539.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139539>

39

Song, M., Cen, L., Zheng, Z., *et al.* (2017). How would big data support societal development and environmental sustainability? Insights and practices. *Journal of Cleaner Production*, 142, 489-500.

<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.10.091>

91

Szromek, A., Puciato, D., Markiewicz-Patkowska, J., Colmekcioglu, N. (2022). Health tourism enterprises and adaptation for sustainable development. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*. <https://doi.org/10.1108/ijchm-01-2022-0060>

Zhong, L., Deng, B., Morrison, A., *et al.* (2021). Medical, Health and Wellness Tourism Research –A Review of the Literature (1970–2020) and Research Agenda. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18.

<https://doi.org/10.3390/ijerph182010875>



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). Sinergias que sanan: Turismo de Salud, Biotecnología y Sustentabilidad en Baja California Sur. *Biotecnológica Magazine*, 3(5), 23-33. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17582123>

Prochlorococcus, el maravilloso microorganismo que en secreto hace funcionar el planeta, podría estar en peligro

Norma Y. Hernández Saavedra
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
nhernan04@cibnor.mx

Tema: Los océanos, que cubren el 70% de la superficie terrestre, son vitales para la vida, ya que producen la mitad del oxígeno del planeta principalmente a través de pequeños organismos fotosintéticos como el fitoplancton y las cianobacterias, especialmente *Prochlorococcus*. Estos microorganismos desempeñan un papel crucial en la regulación del dióxido de carbono atmosférico y el mantenimiento de la cadena alimentaria marina, siendo *Prochlorococcus* el productor primario más abundante y eficiente en aguas tropicales y subtropicales. Sin embargo, el aumento de la temperatura oceánica amenaza su supervivencia, ya que *Prochlorococcus* solo prospera en rangos de temperatura específicos; el cambio climático podría reducir significativamente sus poblaciones, lo que podría perturbar los ecosistemas marinos y alterar la distribución de estos organismos esenciales.

1. Introducción

1.1 Los océanos como pulmones del planeta

Aunque nuestro planeta se llama Tierra, la realidad es que la mayor parte de su superficie está cubierta de agua. Los mares y océanos ocupan el 70 % del planeta, son el hábitat natural de miles de especies animales y vegetales y representan el sustento de millones de personas (Fig. 1). En los océanos se produce más del 50 % del oxígeno del planeta, además este ecosistema es un importante sumidero de carbono ya que absorbe casi una tercera parte del dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera (uno de los principales factores responsables del calentamiento global) (Naciones Unidas, 2022).



Figura 1. Los océanos cumplen un papel en la vida cotidiana, funcionan como los 'pulmones de nuestro planeta' y como fuente de alimentos y medicinas (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente -PNUMA- y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe -CEPAL-) (Naciones Unidas, 2022).

Los principales responsables de la producción de oxígeno en el océano son los organismos fotosintéticos, especialmente el fitoplancton y las cianobacterias (Fig. 2), que realizan la fotosíntesis para producir oxígeno utilizando la energía de la luz solar. Estos organismos microscópicos, parecidos a las plantas, capturan CO₂ de la atmósfera y liberan oxígeno. El fitoplancton es un término general para organismos fotosintéticos microscópicos en el agua, mientras que las cianobacterias son un tipo específico de bacterias fotosintéticas que forman parte del fitoplancton, conocidas como algas verde-azules. Si bien, por un tiempo las cianobacterias fueron consideradas dentro del grupo de las algas, los diversos estudios sobre su genoma y evolución han demostrado que en realidad son bacterias.

Ambos, fitoplancton y cianobacterias, son fundamentales para los ecosistemas acuáticos, ya que realizan la fotosíntesis, producen oxígeno y son la base de la cadena alimentaria marina.

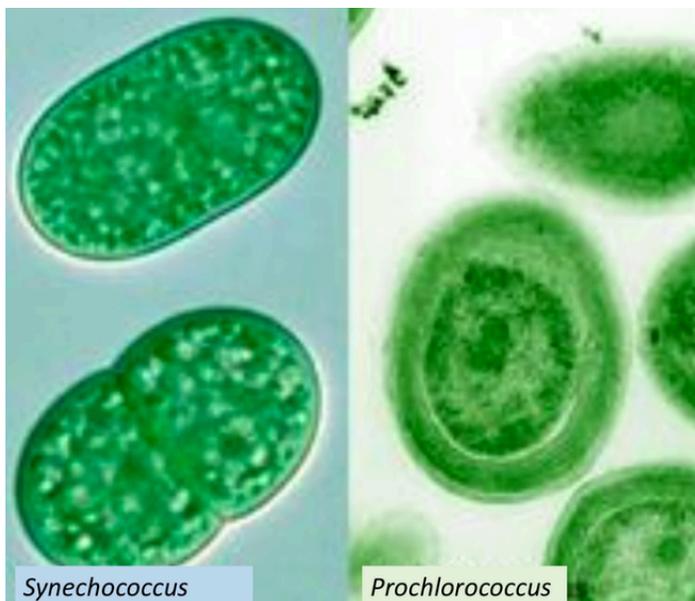


Figura 2. Ejemplos de cianobacterias marinas: *Synechococcus* y *Prochlorococcus* (Tomado de SW, 2025).

1.2 ¿Cuál es la importancia de las cianobacterias?

Sin embargo, las cianobacterias marinas son las responsables de producir más del 50% del oxígeno que se produce en La Tierra. Ellas dotan de oxígeno al mar, permitiendo que respiren los seres marinos. Si las cianobacterias dejaran de cumplir su función, el mar sería un cementerio; ellas generaron la bolsa de oxígeno primigenia de la que aún respiramos en el planeta tierra.

Durante la primera mitad de la historia de nuestro planeta no hubo oxígeno en la atmósfera. Fueron las cianobacterias primigenias las que evolutivamente desarrollaron la fotosíntesis oxigénica: un método para tomar energía de la luz del sol para producir azúcares del agua y el CO₂, que tiene como resultado final la liberación de oxígeno (Fig. 3). En nuestra historia evolutiva, este espectacular evento que se conoce como la “Gran Oxidación” (GO) (Fig. 4; Wikipedia, 2025) o la “revolución del oxígeno”, fue determinante. El aumento de la concentración de oxígeno permitió la aparición de formas de vidas multicelulares, que fueron aumentando su complejidad hasta alcanzar la biodiversidad actual.

La cronología más aceptada de la GO sugiere que el oxígeno libre fue producido primero por los organismos procariontes fotosintéticos (cianobacterias -Fig. 4, estrella morada-) y luego por los eucariotas que surgieron posteriormente llevando a cabo la fotosíntesis oxigénica de forma más eficiente (Fig. 4, estrella verde); el exceso de oxígeno que estos organismos producen es un producto de desecho. Estos organismos vivieron mucho antes de la “Gran oxidación”, quizás hace ya más de 3,500 millones de años (Wikipedia, 2025).

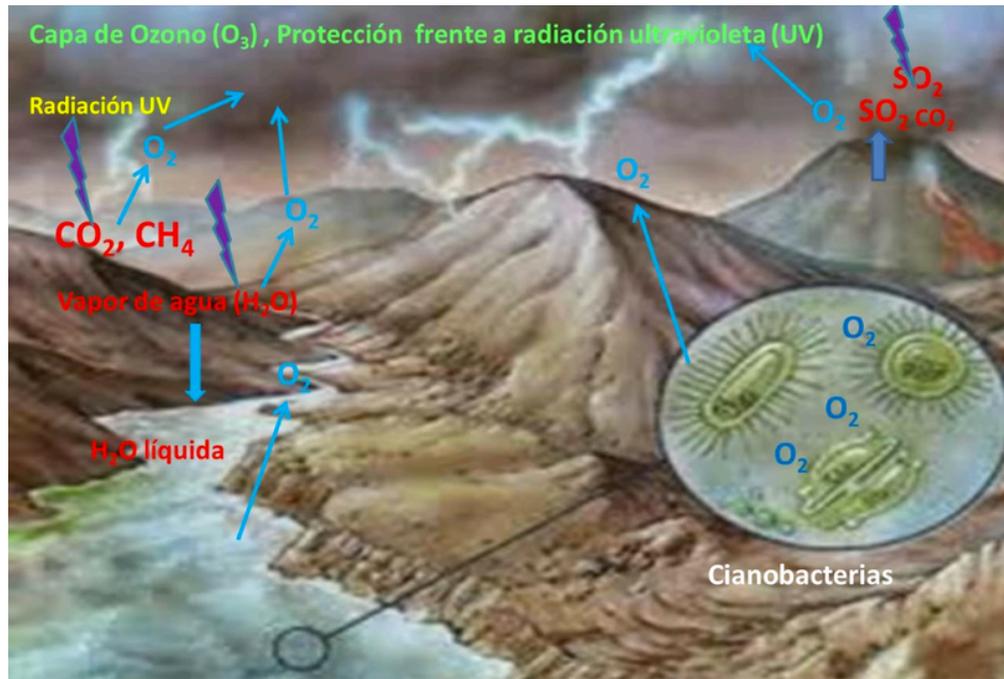


Figura 3. Ilustración de las condiciones de la tierra primigenia durante "la Gran Oxidación" (Tomado de Crónica, 2022).

En la actualidad seguimos viviendo de esta reserva creada durante millones de años (Fig. 4, estrella amarilla), que se mantiene gracias a que el balance con los otros procesos donde el consumo oxígeno es casi nulo. Sólo una milésima parte de la actividad fotosintética mundial escapa de los procesos biológicos y se agrega al oxígeno atmosférico.

2. *Prochlorococcus*

Prochlorococcus es el género de cianobacterias marinas cuyo tamaño oscila entre las 0.4 a 0.6 micras y contiene clorofila *b* como pigmento fotosintético. Estas bacterias pertenecen a la fracción del plancton denominado picoplancton y son la forma de vida más abundante (Fig. 5) en el océano y la Tierra.

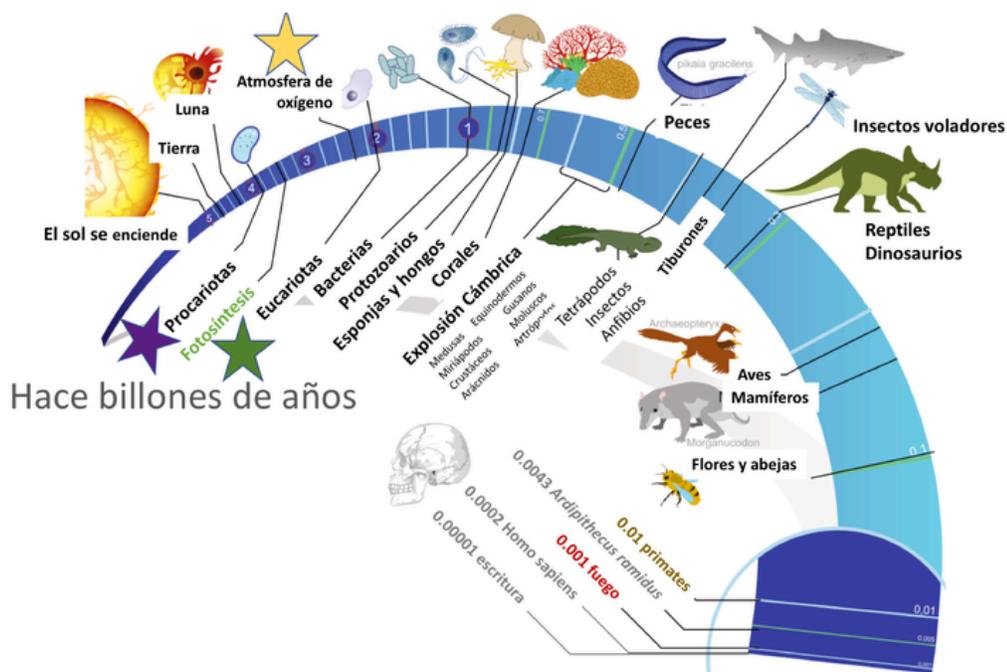


Figura 4. Línea de tiempo de la historia de la vida (Tomado de Wikipedia, 2025).

Junto con *Synechococcus*, *Prochlorococcus* son los principales productores primarios, siendo ambos los principales responsables de gran porcentaje de la producción fotosintética de oxígeno (Fig. 2) (Munn, 2011). El análisis de las secuencias del genoma de 12 cepas de *Prochlorococcus* muestran que 1,100 genes son comunes en todas las cepas, y el tamaño medio de genoma es de aproximadamente 2,000 genes mientras que las algas eucariotas contienen más de 10,000 genes (Kettler et al., 2007)

Poco se sabía de *Prochlorococcus* antes de 1988. Entonces se encontró que *Prochlorococcus*, era una cianobacteria marina que podía vivir en condiciones extremas y de la que se creía que sólo se alimentaba de la luz, es decir, generando su propio alimento por el proceso de la fotosíntesis. Sin embargo, un equipo de investigación del Departamento de Bioquímica y Biología Molecular de la Universidad de Córdoba demostró que *Prochlorococcus* es perfectamente capaz de absorber glucosa del océano (Muñoz-Marín et al., 2017). Esta capacidad (generar energía a partir de la absorción de la glucosa) es una de la adaptabilidad de este organismo que sabe aprovechar la luz –que sigue siendo su principal fuente de energía y la única que garantiza su supervivencia- y otros recursos para sobrevivir en un medio en el que entra en competencia con otras especies (Universidad de Córdoba, 2013).

3. ¿Parte de nuestro pulmón marino está en peligro?

Prochlorococcus es el organismo fotosintetizador más abundante en el océano, y por sí solo representa el 5 % de la fotosíntesis global.

Dado que *Prochlorococcus* prospera en los trópicos, los investigadores predijeron que se adaptaría bien al calentamiento global. Sin embargo, un estudio reciente ha revelado que *Prochlorococcus* prefiere aguas entre los 19 y 29 °C y no tolera temperaturas mucho más cálidas (Ribalet et al., 2025). Lo preocupante, es que los modelos climáticos predicen que las temperaturas oceánicas subtropicales y tropicales superarán ese umbral en los próximos 75 años.

En los últimos 10 años, Ribalet et al. (2025) realizaron cerca de 100 cruceros de investigación para estudiar *Prochlorococcus*. Su equipo analizó alrededor de 800 mil millones de células del tamaño de *Prochlorococcus* a lo largo de 240,000 kilómetros alrededor del mundo para determinar su estado y si pueden adaptarse a las nuevas condiciones que se pronostican. Los resultados mostraron que la tasa de división celular varía con la latitud, posiblemente debido a la cantidad de nutrientes disponibles, la luz solar o la temperatura. Los investigadores descartaron los niveles de nutrientes y la luz solar antes de centrarse en la temperatura. *Prochlorococcus* se multiplica con mayor eficiencia en aguas entre 19 y 29 °C, pero por encima de 29 °C, la tasa de división celular se desplomó, reduciéndose a tan solo un tercio de la tasa observada a 19 °C y la abundancia celular siguió la misma tendencia (Fig. 5).

En el océano, la turbulencia (mezcla) transporta la mayoría de los nutrientes a la superficie desde las profundidades. Esto ocurre más lentamente en aguas cálidas, y las aguas superficiales en las regiones más cálidas del océano son escasas en nutrientes.



Figura 5. Clasificación del fitoplancton con base en su tamaño (Tomado de Samudio Reséndiz et al., 2023).

Las cianobacterias son uno de los pocos microbios que se han adaptado a vivir en estas condiciones. Sin embargo, en alta mar, en los trópicos, el agua es de un azul brillante y hermoso porque contiene muy poco fitoplancton, aparte de *Prochlorococcus*. Los microbios, al ser tan pequeños, pueden sobrevivir en estas áreas porque requieren muy poco alimento. Su actividad sustenta la mayor parte de la cadena alimentaria marina, desde pequeños herbívoros acuáticos hasta ballenas (University of Washington, 2025).

4. ¿Que podemos esperar?

Prochlorococcus es una de las dos cianobacterias que dominan las aguas tropicales y aguas subtropicales. La otra, *Synechococcus*, es más grande, con un genoma menos estilizado. Los investigadores descubrieron que, aunque *Synechococcus* puede tolerar aguas más cálidas, necesita más

nutrientes para sobrevivir. Si la población de *Prochlorococcus* disminuye, *Synechococcus* podría ayudar a cubrir la escasez, pero no está claro cuál sería el impacto en la red alimentaria. Si *Synechococcus* se impone, no es seguro que otros organismos puedan interactuar con ella de la misma manera que lo han hecho con *Prochlorococcus* durante millones de años (University of Washington, 2025; Macho Stadler, 2025).

Las proyecciones climáticas estiman las temperaturas oceánicas basándose en las tendencias de las emisiones de gases de efecto invernadero. En este estudio, los investigadores analizaron cómo podría comportarse *Prochlorococcus* en escenarios de calentamiento moderado y alto. En los trópicos, un calentamiento moderado podría reducir la productividad de *Prochlorococcus* en un 17 %, pero un calentamiento más severo la diezmaría

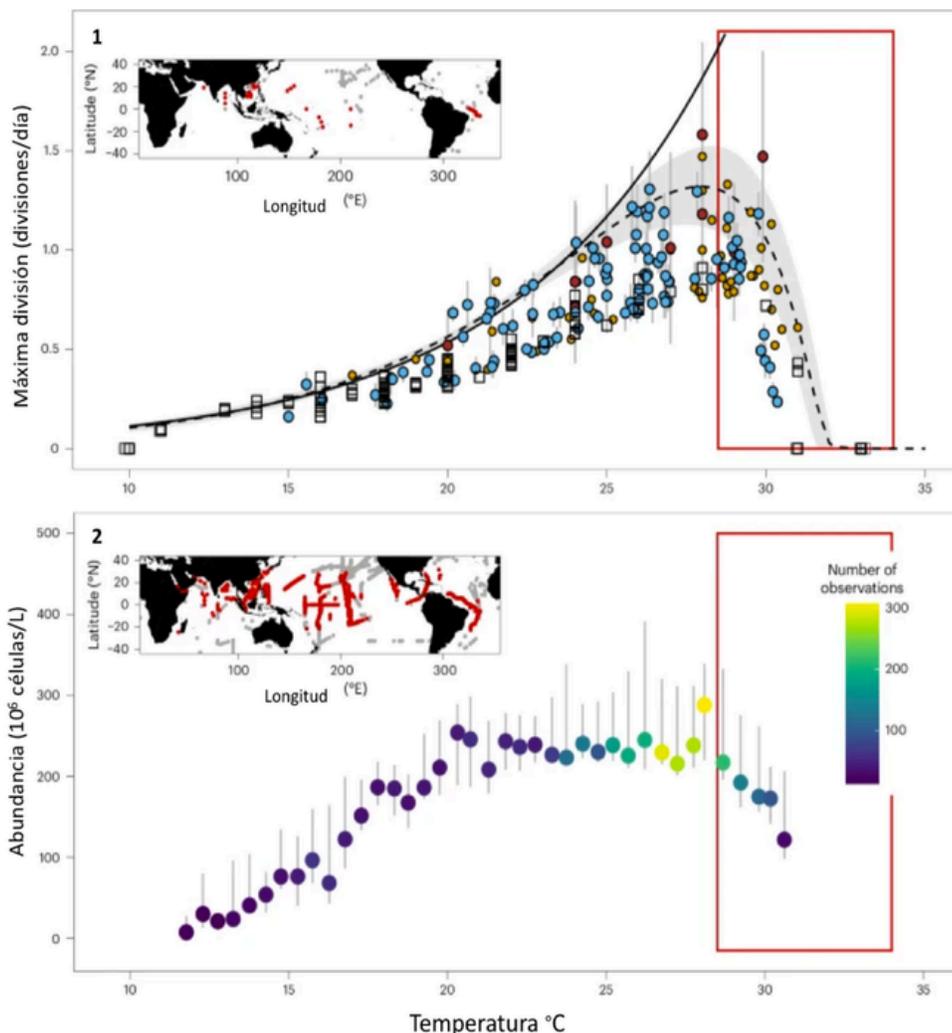


Figura 6. Respuestas dependientes de la temperatura en poblaciones de *Prochlorococcus*. En el panel 1 se muestra la relación entre la temperatura y el número de divisiones celulares por día, y en el panel 2, se muestra la abundancia de células en función de la temperatura del océano (Tomado de Ribalet et al., 2025).

en un 51 %. A nivel mundial, el escenario moderado produjo una disminución del 10 %, mientras que los pronósticos más cálidos redujeron a *Prochlorococcus* en un 37 %.

5. Conclusiones

Durante millones de años, *Prochlorococcus* ha perfeccionado la capacidad de hacer más con menos, eliminando genes que no necesitaba y conservando sólo lo esencial para la vida en aguas tropicales pobres en nutrientes. Esta estrategia dio resultados espectaculares, pero ahora, como el calentamiento de los océanos

está sucediendo más rápido que nunca, *Prochlorococcus* se ve limitado por su genoma. No puede recuperar genes de respuesta al estrés que descartó desde hace mucho tiempo. Su distribución geográfica se expandirá hacia los polos, al norte y al sur, de acuerdo con Ribalet et al. (2025). *Prochlorococcus* no van a desaparecer, pero su hábitat cambiará, lo que podría tener consecuencias drásticas para los ecosistemas subtropicales y tropicales.

6. Referencias

Crónica. 2022. Microbios y minerales pudieron desatar la oxigenación de la Tierra. Crónica. Consultado 01/10/2025.

Kettler G.C., Martiny A.C., Huang K., Zucker J., Coleman M.L., Rodrigue S., Chen F., Lapidus A., Ferriera S., Johnson J., Steglich C., Church G.M., Richardson P., Chisholm S.W. 2007. Patterns and implications of gene gain and loss in the evolution of *Prochlorococcus*. PLoS Genet, 3(12):e231.

Macho Stadler M. 2025. El microorganismo que hace funcionar el planeta en secreto. Mujeres con ciencia. Consultado 01/10/2025.

Munn, C. 2011. Marine Microbiology: ecology and applications. Second Ed. Garland Science.

Muñoz-Marín MD, Gómez-Baena G, Díez J, Beynon RJ, González-Ballester D, Zubkov MV, García-Fernández JM. 2017. Glucose Uptake in *Prochlorococcus*: Diversity of Kinetics and Effects on the Metabolism. Front Microbiol, 8(8):327.

Naciones Unidas, 2022. Salvemos Los Océanos. X. Consultado 01/10/2025.

Ribalet, F., Dutkiewicz, S., Monier, E. *et al.* 2025. Future ocean warming may cause large reductions in *Prochlorococcus* biomass and productivity. Nat Microbiol, 10: 2441-2453.

Samudio Resendiz M.E., Hernández Márquez S., Balboa Calvillo A.K. 2023. Fitoplancton. UAM. P23.

SW. 2025. With names like *Thalassionema*, *Synechococcus*, and *Prochlorococcus*, these microscopic organisms are hard for people to connect with, but they are the foundation of life on our planet. Sail World. Consultado 01/10/2025.

Universidad de Córdoba. 2013. El rey del mar mide 0,4 micras y vive de luz y glucosa. SiNC.

Consultado 01/10/2025.

University of Washington. 2025. The ocean's most abundant microbe is near its breaking point. ScienceDaily. Consultado 01/10/2025.

Wikipedia. 2025. La Gran oxidación. Wikipedia. Consultado 01/10/2025.

Cita:

Hernandez Saavedra, N. Y. (2025). *Prochlorococcus*, el maravilloso microorganismo que en secreto hace funcionar el planeta, podría estar en peligro. *BiotechnoLógica Magazine*, *3(5)*, 34-40. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17583762>

Avances recientes en la investigación del cáncer de mama

Felipe Ascencio

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

ascencio@cibnor.mx

Tema: La investigación sobre el cáncer de mama evoluciona rápidamente con avances en terapias dirigidas e inmunoterapia, medicina de precisión y tecnologías de diagnóstico que ofrecen nuevas esperanzas para mejorar los resultados, especialmente en subtipos complejos como el cáncer de mama triple negativo (CMTN). La investigación en curso busca personalizar aún más el tratamiento, superar la resistencia y mejorar la detección temprana para una mejor atención a las pacientes.

1. Introducción

El cáncer de mama es una enfermedad en la que las células del tejido mamario se multiplican sin control, formando tumores malignos que pueden invadir tejidos cercanos y, en etapas avanzadas, hacer metástasis a otras partes del cuerpo como ganglios linfáticos y órganos (Hernández Saavedra, 2023). Es el tipo de cáncer más diagnosticado a nivel mundial en mujeres y puede afectar a cualquier edad desde la pubertad.

Existen varios tipos de cáncer de mama, siendo los más comunes el carcinoma ductal (que inicia en los conductos mamarios) y el carcinoma lobulillar (que comienza en los lóbulos o lobulillos). Otros tipos menos frecuentes incluyen el cáncer inflamatorio y la enfermedad de Paget del pezón. Se consideran como factores de riesgo antecedentes familiares, las mutaciones genéticas hereditarias (como BRCA1, BRCA2 y PALB2), la edad avanzada, el estilo de vida, además de ciertas condiciones hormonales.

Los síntomas varían desde la aparición de bultos, cambios en la forma o tamaño del seno, hasta alteraciones en la piel o el pezón. El diagnóstico temprano es clave y se realiza

mediante la combinación de la autoexploración, mamografías y estudios especializados (Hernández Saavedra, 2023).

El tratamiento depende del tipo y estadio del cáncer e incluye cirugía, radioterapia, quimioterapia, terapias hormonales y biológicas, y cuidados paliativos según el caso. La detección precoz y el tratamiento oportuno mejoran significativamente el pronóstico y la supervivencia (CDC, 2024; OMS, 2024).

2. Avances recientes en la investigación del cáncer de mama: Terapias dirigidas, inmunoterapia y medicina de precisión

Como se muestra en la Tabla 1, se han logrado avances significativos en la investigación del cáncer de mama, con avances que abarcan terapias dirigidas, inmunoterapia, medicina de precisión y nuevos enfoques diagnósticos.

2.1 Terapias dirigidas y medicina de precisión.

En los últimos años, se han desarrollado y la FDA ha aprobado por terapias dirigidas para diversos subtipos de cáncer de mama, incluyendo: inhibidores de las quinasas dependientes de ciclina, la poli (ADP-ribosa) polimerasa (PARP) y las vías de los factores de crecimiento.

Tabla 1. Principales avances en la investigación reciente y el tratamiento del cáncer de mama.

Área de Avance	Desarrollos clave	Referencias
Terapias dirigidas	Inhibidores de CDK4/6, PARP, PI3K/AKT/mTOR; ADCs; agentes dirigidos a HER2	Ye <i>et al.</i> , 2023; Subhan <i>et al.</i> , 2023; Hong y Xu, 2022; Mercogliano <i>et al.</i> , 2023; Lloyd <i>et al.</i> , 2024
Inmunoterapia	Inhibidores de la citocromo P450 (ICI), combinación con quimioterapia, selección de pacientes basada en biomarcadores	Ye <i>et al.</i> , 2023; Li <i>et al.</i> , 2022; Leon-Ferre y Goetz, 2023; Zhu <i>et al.</i> , 2023; Liu <i>et al.</i> , 2023
Medicina de precisión	Perfiles genómicos, terapia individualizada, descubrimiento de biomarcadores	Subhan <i>et al.</i> , 2023; Hong y Xu, 2022; Radovich, 2024; Lloyd <i>et al.</i> , 2024; Rakha y Pareja, 2020
Diagnósticos novedosos, teranósticos	Nanopartículas, biopsia líquida, secuenciación unicelular	Alamdari <i>et al.</i> , 2022; Sharma <i>et al.</i> , 2024; An <i>et al.</i> , 2021; Bhushan <i>et al.</i> , 2021; Rakha y Pareja, 2020; Goel y Chandralapaty, 2022
Superando la resistencia	Terapias combinadas, nuevas dianas farmacológicas, monitorización molecular	Ye <i>et al.</i> , 2023; Leon-Ferre y Goetz, 2023; Hong y Xu, 2022; An <i>et al.</i> , 2021; Radovich, 2024

Estas terapias se adaptan a características moleculares específicas, como el estado del receptor hormonal (RH) y la expresión del Receptor 2 del factor de crecimiento epidérmico humano (HER2), y han mejorado los resultados en muchas pacientes. Sin embargo, la farmacoresistencia y la eficacia limitada en el cáncer de mama triple negativo (CMTN) siguen siendo un desafío. La medicina de precisión, que aprovecha la secuenciación de última generación y los enfoques basados en biomarcadores, se orienta cada vez más a decisiones terapéuticas individualizadas y a estrategias de combinación para maximizar el beneficio del paciente y minimizar la toxicidad (Ye *et al.*, 2023; Subhan *et al.*, 2023; Hong y Xu, 2022; Radovich, 2024; Lloyd *et al.*, 2024).

2.2 Avances en el cáncer de mama triple negativo (CMTN)

El CMTN, el subtipo más agresivo y heterogéneo, ha carecido históricamente de opciones dirigidas eficaces. Los avances recientes incluyen el desarrollo de terapias dirigidas contra las vías de reparación del ADN,

la señalización del receptor de andrógenos y las quinasas, así como la aprobación de conjugados anticuerpo-fármaco (ADC) e inhibidores de puntos de control inmunitario (ICI).

La inmunoterapia, en particular, en combinación con quimioterapia ha mejorado las tasas de supervivencia y respuesta en el cáncer de mama triple negativo (CMTN). Actualmente, se están llevando a cabo ensayos que exploran las combinaciones óptimas y la selección de pacientes según los subtipos moleculares y biomarcadores que presentan (Li *et al.*, 2022; Leon-Ferre y Goetz, 2023; Zhu *et al.*, 2023; Subhan *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2023).

2.3 Enfermedad HER2-positiva y HR-positiva

Para el cáncer de mama HER2-positivo, los nuevos agentes dirigidos a HER2 —incluidos los anticuerpos monoclonales, los ADC y los inhibidores de la tirosina quinasa— están ampliando las opciones de tratamiento, especialmente para pacientes con resistencia a las terapias de primera línea. En la enfermedad metastásica con receptor de HR positivo, se están integrando terapias endocrinas de nueva

generación, inhibidores de CDK4/6 e inhibidores de la vía PI3K/AKT/mTOR en los regímenes de tratamiento. Se está investigando continuamente para superar la resistencia y perfeccionar la secuenciación terapéutica (Hong y Xu, 2022; Mercogliano et al., 2023; Lloyd et al., 2024).

2.4 Enfoques de combinación e inmunoterapia

La combinación de terapias dirigidas con inmunoterapia (p. ej., inhibidores de puntos de control inmunitario más inhibidores de HER2 o CDK4/6) es un área en crecimiento, cuyo objetivo es superar la resistencia y mejorar los resultados en la enfermedad metastásica y agresiva (Ye et al., 2023; Wang y Minden, 2022).

3. Terapias dirigidas para el cáncer de mama

3.1 Estrategias actuales y enfoques emergentes

Las terapias dirigidas han transformado el tratamiento del cáncer de mama al centrarse en las características específicas de los tumores, lo que ha dado lugar a opciones más eficaces y menos tóxicas en comparación con la quimioterapia tradicional. Estas terapias se adaptan a los subtipos de cáncer de mama definidos por el receptor hormonal (RH) y el estado de HER2, y la investigación en curso amplía las opciones para formas agresivas como el cáncer de mama triple negativo (CMTN) (Tabla 2).

4. En el cáncer de mama las terapias combinadas dirigidas suelen ser más eficaces que las monoterapias

Las terapias combinadas dirigidas suelen ser más eficaces que las monoterapias para el cáncer de mama, especialmente en casos

avanzados o resistentes, pero requieren una cuidadosa consideración de la toxicidad y las características de la paciente para optimizar los resultados (Tabla 3).

4.1 Efectividad de la combinación vs. la monoterapia

- Las terapias combinadas dirigidas generalmente muestran mayor eficacia que las monoterapias para mejorar la supervivencia libre de progresión (SLP), la supervivencia global (SG) y las tasas de respuesta objetiva (TRO) en múltiples subtipos de cáncer de mama, especialmente en la enfermedad avanzada o resistente (Wang y Minden, 2022; Khan et al., 2025; Wang et al., 2024).
- En el cáncer de mama HER2 positivo, los regímenes de doble diana (p. ej., trastuzumab más pertuzumab) y las combinaciones con quimioterapia mejoran significativamente la SLP y la SG en comparación con la terapia con un solo agente (Wang J et al., 2024; Li et al., 2021). En la enfermedad con receptores hormonales positivos (HR+), la combinación de terapia endocrina con agentes dirigidos (p. ej., inhibidores de CDK4/6 o mTOR) reduce el riesgo de progresión de la enfermedad y mejora la supervivencia, con una eficacia similar en pacientes mayores y jóvenes, aunque con mayor toxicidad (Freedman y Tolaney, 2018; Khan et al., 2025).

En el cáncer de mama triple negativo (CMTN), la terapia combinada con inhibidores de puntos de control inmunitario (ICI) produce tasas de respuesta más altas (TRO ~27%) que la terapia con ICI como agente único (TRO

Tabla 2. Terapias dirigidas para el cáncer de mama: Clases de terapia dirigida y sus principales aplicaciones.

Tipo de Terapia Dirigida	Características	Referencias
Terapias dirigidas a HER2	Fármacos como trastuzumab, pertuzumab y conjugados anticuerpo-fármaco (T-DM1, T-DXd) han mejorado drásticamente los resultados del cáncer de mama HER2 positivo. Agentes más nuevos (p. ej., tucatinib, neratinib) y estrategias de combinación están abordando la resistencia y expandiendo su uso a subtipos con baja expresión de HER2	Mercogliano <i>et al.</i> , 2023; Swain <i>et al.</i> , 2022
Terapias dirigidas a receptores hormonales (RH)	Las terapias endocrinas (p. ej., tamoxifeno, inhibidores de la aromatasas) siguen siendo el estándar para los cánceres con RH positivo. Los inhibidores de CDK4/6 (palbociclib, ribociclib) y los inhibidores de la vía PI3K/mTOR (everolimus, alpelisib) están aprobados para la enfermedad avanzada, lo que mejora la supervivencia y retrasa la resistencia	Ye <i>et al.</i> , 2023; Cetinkaya y Avci, 2022
Terapias dirigidas para el cáncer de mama triple negativo (CMTN)	Los avances incluyen inhibidores de PARP para cánceres con mutaciones en BRCA, inhibidores de PI3K/AKT/mTOR y conjugados anticuerpo-fármaco. Los inhibidores de puntos de control inmunitario (p. ej., pembrolizumab) también están aprobados en combinación con quimioterapia	Ye <i>et al.</i> , 2023; Zhu <i>et al.</i> , 2023; Szulc y Woźniak, 2024; Wang y Minden, 2022
Objetivos emergentes	Se están investigando terapias dirigidas al receptor de andrógenos (RA), nuevos inhibidores de quinasas y agentes dirigidos al microambiente tumoral, especialmente para subtipos resistentes o raros	Sun <i>et al.</i> , 2022

Tabla 3. Afirmaciones clave y evidencia a favor de las terapias combinadas frente a la monoterapia en el cáncer de mama.

Afirmación	Fuerza de la evidencia	Fuerza de la evidencia	Fuerza de la evidencia
Las terapias combinadas dirigidas mejoran la supervivencia libre de progresión/supervivencia global en comparación con la monoterapia.	Fuerte (9/10)	Respaldado por meta-análisis y ensayos controlados aleatorizados a gran escala en todos los subtipos.	Khan <i>et al.</i> , 2025; Wang <i>et al.</i> , 2024
La terapia combinada con inhibidores de puntos de control (ICI) es más eficaz que la terapia con ICI de agente único en el cáncer de mama triple negativo.	Fuerte (8/10)	El meta-análisis muestra una mayor tasa de respuesta objetiva para la combinación de ICI en el cáncer de mama triple negativo metastásico.	Zavras <i>et al.</i> , 2025; Li <i>et al.</i> , 2023; Keenan y Toloney, 2020
La terapia combinada aumenta la toxicidad.	Moderado (7/10)	Se han reportado tasas más altas de eventos adversos, especialmente en pacientes mayores o frágiles.	Freedman y Toloney, 2018; Wang <i>et al.</i> , 2024

~8%), y la combinación de agentes dirigidos con quimioterapia puede mejorar aún más los resultados, aunque los beneficios pueden ser modestos y dependen de los agentes específicos utilizados (Zavras et al., 2025; Li et al., 2023; Keenan y Tolaney, 2020).

4.2 Seguridad y selección de pacientes

- Las terapias combinadas suelen aumentar la toxicidad en comparación con la monoterapia, por lo que la selección de pacientes y el equilibrio entre la eficacia y los efectos secundarios son fundamentales, especialmente en pacientes frágiles o de edad avanzada (Freedman y Tolaney, 2018; Wang J et al., 2024).
- La terapia secuencial con un solo agente puede ser preferible para pacientes con enfermedad indolente o que no toleran regímenes combinados (Freedman y Tolaney, 2018).

5. Inhibidores de puntos de control inmunitario combinados con quimioterapia: Mayor eficacia en el cáncer de mama metastásico

La combinación de inhibidores de puntos de control inmunitario (ICI) con quimioterapia se ha convertido en una estrategia clave en el tratamiento del cáncer de mama metastásico, especialmente el cáncer de mama triple negativo (CMTN). La evidencia muestra mejoras notables en la supervivencia libre de progresión (SLP) y las tasas de respuesta objetiva (TRO), especialmente en pacientes con tumores PD-L1 positivos.

5.1 Eficacia comparativa: hallazgos clave

Supervivencia libre de progresión (SLP): Múltiples metanálisis y ensayos aleatorizados demuestran que añadir ICI a

la quimioterapia mejora significativamente la SLP en el CMTN metastásico en comparación con la quimioterapia sola. Por ejemplo, los análisis agrupados indican un cociente de riesgos instantáneos (HR) para la SSP de 0,81 (IC del 95 %: 0,74-0,90) en la población general y de 0,67 (IC del 95 %: 0,58-0,79) en pacientes con PD-L1 positivo, lo que indica una reducción sustancial del riesgo de progresión (Wang Y et al., 2024; Villacampa et al., 2022; Neil y Lee, 2025).

- **Supervivencia global (SG):** El beneficio en la SG es más modesto y, en ocasiones, no alcanza la significación estadística. En el cáncer de mama triple negativo con PD-L1 positivo, existe una tendencia hacia una mejor SG (HR ~0.79-0.89), pero los resultados son menos consistentes entre los estudios (Wang Y et al., 2024; Villacampa et al., 2022; Neil y Lee, 2025; Gao et al., 2023).
- **Tasa de Respuesta Objetiva (TRO):** La combinación de ICI y quimioterapia aumenta la TRO en comparación con la quimioterapia sola, y los meta-análisis muestran mejoras significativas, especialmente en los subgrupos con PD-L1 positivo (Neil y Lee, 2025; Gao et al., 2023).
- **Efectos de subgrupo:** El mayor beneficio se observa en pacientes sin quimioterapia previa y con PD-L1 positivo. No se observa ningún beneficio significativo en las poblaciones sin cáncer de mama triple negativo (CMTN) con PD-L1 negativo o HER2 negativo (Wang Y et al., 2024; Villacampa et al., 2022; Gao et al., 2023; Neil y Lee, 2025).

Toxicidad: Los regímenes combinados aumentan los eventos adversos inmunitarios, pero el perfil de seguridad es

generalmente manejable (Wang Y *et al.*, 2024; Villacampa *et al.*, 2022; Røssevold *et al.*, 2022).

6. Tecnologías emergentes y futuras tendencias

Innovaciones como la terapia fototérmica basada en nanopartículas, la nanoteranóstica y los diagnósticos moleculares avanzados (p. ej., biopsia líquida y secuenciación unicelular) están mejorando la detección temprana, la monitorización y el tratamiento personalizado. La investigación también se centra en comprender y superar la farmacorresistencia, perfeccionar la clasificación molecular y desarrollar nuevos biomarcadores para guiar la intensificación o desescalada de la terapia (Alamdari *et al.*, 2022; Sharma *et al.*, 2024; An *et al.*, 2021; Radovich, 2024; Bhushan *et al.*, 2021; Rakha y Pareja, 2020; Goel y Chandarlapaty, 2022).

7. Retos y futuras direcciones

Los principales retos incluyen la farmacorresistencia, la identificación de biomarcadores predictivos y la optimización de la selección de pacientes. La investigación en curso se centra en nuevos objetivos moleculares, regímenes combinados y enfoques de medicina personalizada para mejorar aún más la eficacia y reducir la toxicidad (Ye *et al.*, 2023; Cetinkaya y Avci, 2022; Swain *et al.*, 2022).

Las terapias dirigidas han revolucionado la atención del cáncer de mama, especialmente para los subtipos HER2+ y HR+, y están evolucionando rápidamente para el cáncer de mama triple negativo. La investigación en curso busca superar la resistencia, ampliar las opciones para cánceres difíciles de tratar y personalizar la terapia para obtener resultados óptimos.

8. Referencias

- Alamdari, S., Amini, M., Jalilzadeh, N., et al.** (2022). Recent advances on nanoparticle-based photothermal therapy for breast cancer. *Journal of controlled release: official journal of the Controlled Release Society*. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2022.06.050>
- An, J., Peng, C., Tang, H., et al.** (2021). New Advances in the Research of Resistance to Neoadjuvant Chemotherapy in Breast Cancer. *International Journal of Molecular Sciences*, 22. <https://doi.org/10.3390/ijms22179644>
- Bhushan, A., Gonsalves, A., Menon, J.** (2021). Current State of Breast Cancer Diagnosis, Treatment, and Theranostics. *Pharmaceutics*, 13. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13050723>
- CDC.** (2024). Información básica sobre cáncer de mama. Center for Disease Control and Prevention <https://www.cdc.gov/breast-cancer/es/about/index.html> (Última visualización 13/Octubre/2025).
- Cetinkaya, B., Avci, B.** (2022). Molecular perspective on targeted therapy in breast cancer: a review of current status. *Medical Oncology (Northwood, London, England)*, 39. <https://doi.org/10.1007/s12032-022-01749-1>
- Freedman, R., Tolaney, S.** (2018). Efficacy and safety in older patient subsets in studies of endocrine monotherapy versus combination therapy in patients with HR+/HER2- advanced breast cancer: a review. *Breast Cancer Research and Treatment*, 167, 607-614. <https://doi.org/10.1007/s10549-017-4560-6>
- Gao, X., Zhu, Y., Wang, P., et al.** (2023). Addition of immune checkpoint inhibitors to chemotherapy versus chemotherapy alone in patients with triple-negative breast cancer: A systematic review and meta-analysis. *Cancer Medicine*, 12, 21873 - 21884. <https://doi.org/10.1002/cam4.6760>

- Goel, S., Chandarlapaty, S. (2022).** Emerging Therapies for Breast Cancer. Cold Spring Harbor perspectives in medicine. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a041333>
- Hernández Saavedra, N. Y. (2023).** Octubre: el mes para informarnos acerca del cáncer de mama. *Biotecnológica Magazine*, 1(4):26–33. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10080852>
- Hong, R., Xu, B. (2022).** Breast cancer: an up-to-date review and future perspectives. *Cancer Communications*, 42, 913 - 936. <https://doi.org/10.1002/cac2.12358>
- Keenan, T., Tolaney, S. (2020).** Role of Immunotherapy in Triple-Negative Breast Cancer. *Journal of the National Comprehensive Cancer Network: JNCCN*, 18 4, 479-489. <https://doi.org/10.6004/jnccn.2020.7554>
- Khan, A., Sisodiya, S., Aftab, M., et al. (2025).** Mechanisms and Therapeutic Strategies for Endocrine Resistance in Breast Cancer: A Comprehensive Review and Meta-Analysis. *Cancers*, 17. <https://doi.org/10.3390/cancers17101653>
- Leon-Ferre, R., Goetz, M. (2023).** Advances in systemic therapies for triple negative breast cancer. *BMJ*, 381. <https://doi.org/10.1136/bmj-2022-071674>
- Li, C., Tzeng, Y., Chiu, Y., et al. (2021).** Pathogenesis and Potential Therapeutic Targets for Triple-Negative Breast Cancer. *Cancers*, 13. <https://doi.org/10.3390/cancers13122978>
- Li, L., Zhang, F., Liu, Z., Fan, Z. (2023).** Immunotherapy for Triple-Negative Breast Cancer: Combination Strategies to Improve Outcome. *Cancers*, 15. <https://doi.org/10.3390/cancers15010321>
- Li, Y., Zhang, H., Merkher, Y., et al. (2022).** Recent advances in therapeutic strategies for triple-negative breast cancer. *Journal of Hematology & Oncology*, 15. <https://doi.org/10.1186/s13045-022-01341-0>
- Liu, Y., Hu, Y., Xue, J., et al. (2023).** Advances in immunotherapy for triple-negative breast cancer. *Molecular Cancer*, 22. <https://doi.org/10.1186/s12943-023-01850-7>
- Lloyd, M., Jhaveri, K., Kalinsky, K., et al. (2024).** Precision therapeutics and emerging strategies for HR-positive metastatic breast cancer. *Nature reviews. Clinical oncology*. <https://doi.org/10.1038/s41571-024-00935-6>
- Mercogliano, M., Bruni, S., Mauro, F., Schillaci, R. (2023).** Emerging Targeted Therapies for HER2-Positive Breast Cancer. *Cancers*, 15. <https://doi.org/10.3390/cancers15071987>
- Neil, V., Lee, S. (2025).** Advancing Cancer Treatment: A Review of Immune Checkpoint Inhibitors and Combination Strategies. *Cancers*, 17. <https://doi.org/10.3390/cancers17091408>
- OMS. (2024).** Cáncer de mama. Organización Mundial de la Salud <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/breast-cancer> (Última visualización 13/Octubre/2025).
- Radovich, M. (2024).** Abstract ED09-01: Emerging approaches to targeting pathways using precision medicine in breast cancer. *Cancer Research*. <https://doi.org/10.1158/1538-7445.sabcs23-ed09-01>
- Rakha, E., Pareja, F. (2020).** New Advances in Molecular Breast Cancer Pathology. *Seminars in cancer biology*. <https://doi.org/10.1016/j.semcancer.2020.03.014>

- Røssevold**, A., Andresen, N., Bjerre, C., et al. (2022). Atezolizumab plus anthracycline-based chemotherapy in metastatic triple-negative breast cancer: the randomized, double-blind phase 2b ALICE trial. *Nature Medicine*, 28, 2573 - 2583. <https://doi.org/10.1038/s41591-022-02126-1>
- Sharma**, M., Shukla, S., Misra, G. (2024). Recent advances in breast cancer cell line research. *International Journal of Cancer*, 154, 1683 - 1693. <https://doi.org/10.1002/ijc.34849>
- Subhan**, M., Parveen, F., Shah, H., et al. (2023). Recent Advances with Precision Medicine Treatment for Breast Cancer including Triple-Negative Sub-Type. *Cancers*, 15. <https://doi.org/10.3390/cancers15082204>
- Sun**, X., Liu, K., Lu, S., et al. (2022). Targeted Therapy and Immunotherapy for Heterogeneous Breast Cancer. *Cancers*, 14. <https://doi.org/10.3390/cancers14215456>
- Swain**, S., Shastry, M., Hamilton, E. (2022). Targeting HER2-positive breast cancer: advances and future directions. *Nature Reviews. Drug Discovery*, 22, 101 - 126. <https://doi.org/10.1038/s41573-022-00579-0>
- Szulc**, A., Woźniak, M. (2024). Targeting Pivotal Hallmarks of Cancer for Enhanced Therapeutic Strategies in Triple-Negative Breast Cancer Treatment—In Vitro, In Vivo and Clinical Trials Literature Review. *Cancers*, 16. <https://doi.org/10.3390/cancers16081483>
- Villacampa**, G., Tolosa, P., Salvador, et al. (2022). Addition of immune checkpoint inhibitors to chemotherapy versus chemotherapy alone in first-line metastatic triple-negative breast cancer: A systematic review and meta-analysis. *Cancer treatment reviews*, 104, 102352. <https://doi.org/10.1016/j.ctrv.2022.102352>
- Wang**, J., Yu, Y., Zhang, J., Song, C. (2024). Abstract PO2-04-07: Efficacy and Safety of First-line Therapy in Patients with HER-2 positive Advanced Breast Cancer: A network Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. *Cancer Research*. <https://doi.org/10.1158/1538-7445.sabcs23-po2-04-07>
- Wang**, Y., Minden, A. (2022). Current Molecular Combination Therapies Used for the Treatment of Breast Cancer. *International Journal of Molecular Sciences*, 23. <https://doi.org/10.3390/ijms231911046>
- Wang**, Y., Sun, Y., Lu, F., et al. (2024). Efficacy and safety of a combination treatment of immune checkpoint inhibitors in metastatic breast cancer: a systematic review and meta-analysis. *Clinical & translational oncology: official publication of the Federation of Spanish Oncology Societies and of the National Cancer Institute of Mexico*. <https://doi.org/10.1007/s12094-024-03396-6>
- Ye**, F., Dewanjee, S., Li, Y., et al. (2023). Advancements in clinical aspects of targeted therapy and immunotherapy in breast cancer. *Molecular Cancer*, 22. <https://doi.org/10.1186/s12943-023-01805-y>
- Zavras**, P., Lara-Martinez, H., Nie, Q., et al. (2025). Abstract 3225: A meta-analysis of single agent versus combination immune checkpoint inhibitors in metastatic triple negative breast cancer. *Cancer Research*. <https://doi.org/10.1158/1538-7445.am2025-3225>
- Zhu**, S., Wu, Y., Song, B., et al. (2023). Recent advances in targeted strategies for triple-negative breast cancer. *Journal of Hematology & Oncology*, 16. <https://doi.org/10.1186/s13045-023-01497-3>



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). Avances recientes en la
investigación del cáncer de mama.
Biotecnológica Magazine, 3(5), 41-49.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.17582266>

Descubrimientos sobre la Regulación del Sistema Inmunitario: El Nobel de Fisiología o Medicina 2025

Felipe Ascencio

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

ascencio@cibnor.mx

Tema: Shimon Sakaguchi, Mary E. Brunkow y Fred Ramsdell ganaron el Premio Nobel de Fisiología o Medicina 2025 por sus descubrimientos pioneros relacionados con la tolerancia inmunitaria periférica. Identificaron las células T reguladoras (T-reg) del sistema inmunitario, que actúan como "guardianes de seguridad" para evitar que el sistema inmunitario ataque a los propios órganos del cuerpo. Esta investigación ha impulsado de forma fundamental la comprensión de cómo se mantiene la tolerancia inmunitaria fuera del timo (más allá de la tolerancia central), lo que ha abierto nuevas vías para el tratamiento de enfermedades autoinmunes, cáncer y complicaciones posteriores a trasplantes de células madre. Sus descubrimientos han sentado las bases para un nuevo campo de investigación en regulación inmunitaria y terapias clínicas en curso.

1. Proceso de cómo se fue dando la investigación que conllevó al Nobel de Fisiología/Medicina 2025

Fase I. El primer descubrimiento clave lo realizó Sakaguchi en 1995. En aquel entonces, los científicos creían que la tolerancia inmunitaria surgía de la eliminación de células inmunitarias dañinas del timo mediante un proceso conocido como tolerancia central. Sakaguchi descubrió una clase de células inmunitarias, entonces desconocida, que podía proteger al organismo de las enfermedades autoinmunes. En concreto, él y su equipo descubrieron que las células T CD4⁺ que expresaban CD25 podían actuar como reguladoras del sistema inmunitario. Sakaguchi se inspiró en experimentos anteriores que demostraban que los ratones a los que se les extirpaban los timos tres días después del nacimiento presentaban un sistema inmunitario hiperactivo, lo que conducía al desarrollo de diversas enfermedades autoinmunes. En la década de 1980, aisló células T y las inyectó

en ratones sin timo, observando que algunas células T parecían proteger contra las enfermedades autoinmunes. En experimentos posteriores, Sakaguchi intentó activar el sistema inmunitario del ratón utilizando células T auxiliares que contienen la proteína CD4 en su superficie. Cuando estos experimentos fracasaron, Sakaguchi se convenció de que debían existir diferentes tipos de células T CD4. Esto condujo al descubrimiento, descrito en su influyente artículo de 1995, de una nueva clase de células T (las células T reguladoras) que contenían proteínas CD4 y CD25 en su superficie.

Fase II. La investigación de Brunkow y Ramsdell proporcionó evidencia que respalda la existencia de células T reguladoras. Posteriormente, centraron su atención en los llamados "ratones con caspa": ratones macho portadores de una mutación que les provoca el desarrollo de una enfermedad autoinmune específica.

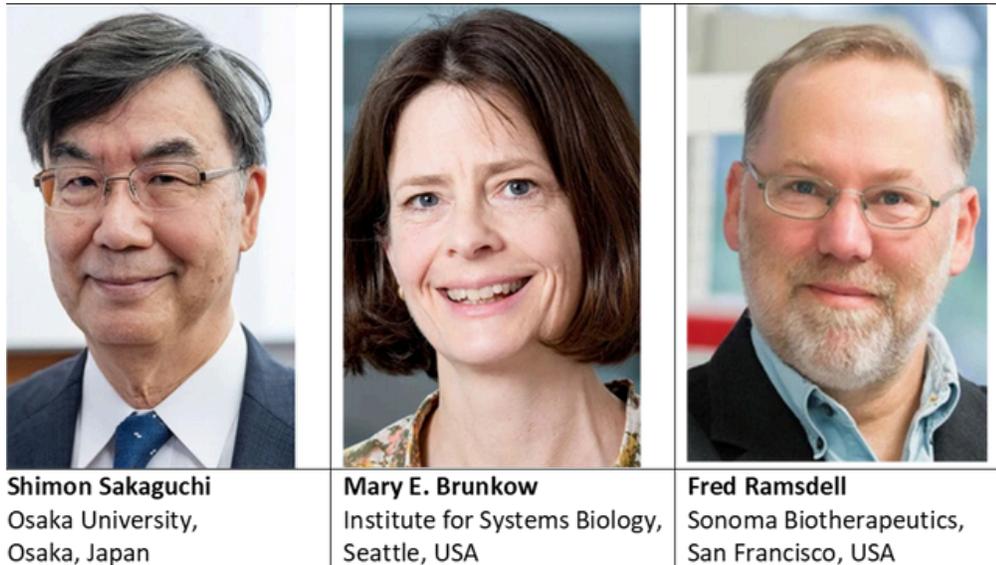


Figura 1. Sakaguchi, Brunkow y Ramsdell ganan el Premio Nobel de Fisiología o Medicina 2025 por sus aportaciones a la comprensión de la Tolerancia Inmunitaria Periférica (Fuente: <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2025/popular-information/> <https://www.nature.com/articles/d41586-025-03193-3>)

Intrigados por los mecanismos moleculares subyacentes a esta enfermedad, Brunkow y Ramsdell creyeron que podría aportar nuevos conocimientos sobre los mecanismos de las enfermedades autoinmunes. Identificaron una mutación en un gen de estos ratones, al que denominaron “forkhead box P3” (Foxp3). En 2001, publicaron un artículo en *Nature Genetics* que demostraba que la mutación en este gen en humanos causa una enfermedad autoinmune rara, el síndrome de desregulación inmunitaria, poliendocrinopatía y enteropatía ligada al cromosoma X (IPEX), y explicaron la patogénesis de los ratones con caspa.

Fase III. Dos años después de que Brunkow y Ramsdell publicaron sus hallazgos, Sakaguchi demostró que Foxp3 se expresa selectivamente en los linfocitos T CD4⁺CD25⁺ y que, al introducir Foxp3 en los linfocitos T CD4⁺ mediante un retrovirus, logró convertir los linfocitos T CD4⁺ convencionales en los

linfocitos T que había identificado previamente. Su investigación demostró que estas células (ahora denominadas linfocitos T reguladores) pueden actuar como protectoras de otras células inmunitarias, impidiendo que dañen el organismo.

2. Linfocitos T reguladores y sus mecanismos de acción

Los linfocitos T reguladores (Treg) son un subgrupo especializado de linfocitos T que desempeñan un papel crucial en el mantenimiento de la tolerancia inmunitaria y la prevención de enfermedades autoinmunes, suprimiendo la activación y proliferación de otras células inmunitarias que podrían atacar tejidos propios. Sus características clave son la expresión de CD4, CD25 y el factor de transcripción FOXP3, esencial para su desarrollo y función supresora.

Los Treg suprimen la respuesta inmunitaria mediante múltiples mecanismos, entre los más relevantes se pueden mencionar:

- Secreción de citocinas inhibitoras como la interleucina-10 (IL-10), el factor de crecimiento transformante β (TGF- β) y la IL-35, inhibiendo así la activación inmunitaria.
- Lisis de células diana a través de las vías de la granzima y la perforina, destruyendo directamente las células inmunitarias efectoras.
- Las alteraciones metabólicas, como la depleción de IL-2 y la producción de adenosina, privan a los linfocitos T efectoras de importantes factores de crecimiento e inhiben su función. Regulan la maduración y la función de las células dendríticas, limitando su capacidad para activar otras células inmunitarias.

Mediante estos mecanismos, las células Treg mantienen la tolerancia inmunitaria periférica (previniendo la autoinmunidad) y ayudan a controlar las respuestas inflamatorias. Sin embargo, también pueden limitar las respuestas inmunitarias beneficiosas, como la inmunidad antitumoral. La disfunción o deficiencia de células Treg puede provocar enfermedades autoinmunes graves, lo que pone de relieve su papel regulador en la homeostasis inmunitaria (Vignali et al., 2008; Grover et al., 2021; Dikiy y Rudensky, 2023).

3. Foxp3 controla el desarrollo de las células T reguladoras

El gen Foxp3 codifica un factor de transcripción que es un regulador clave del desarrollo, la identidad y la función supresora de las células Treg. Como factor específico de linaje, Foxp3 programa las células T para que

se conviertan en Treg en lugar de células T convencionales. Los mecanismos por los cuales Foxp3 regula el desarrollo de las células Treg incluyen:

- Foxp3 se une a las regiones reguladoras de múltiples genes, activando o reprimiendo directamente su transcripción, estableciendo así programas de expresión génica específicos para las células Treg.
- Foxp3 reprime genes involucrados en la activación convencional de las células T (como Il2 e Ifng), suprimiendo así las respuestas inmunitarias efectoras.
- Foxp3 recluta complejos modificadores de la cromatina (histonas acetiltransferasas y desacetilasas) para alterar el estado de la cromatina, activando o reprimiendo así la expresión génica.
- La expresión de Foxp3 se induce en las células Treg en desarrollo a través de una vía de señalización que involucra factores de transcripción, como c-Rel, miembro de la familia NF- κ B, NFAT, CREB, STAT5 y otros factores de transcripción que se unen a elementos reguladores en el locus Foxp3.
- Los mecanismos epigenéticos, como la hipometilación del ADN de ciertas secuencias no codificantes conservadas dentro del locus Foxp3, estabilizan la expresión de Foxp3 y la identidad de las células Treg.
- Las modificaciones postraduccionales de Foxp3, como la acetilación, la ubiquitinación y la fosforilación, regulan su unión al ADN y su actividad reguladora transcripcional.

La expresión de Foxp3 por sí sola es necesaria para la función completa de las células Treg, pero no es suficiente, ya que otros programas epigenéticos también contribuyen a la identidad estable y la función supresora de las células Treg. En resumen, Foxp3 induce y mantiene un entorno transcripcional y epigenético que configura una célula inmunitaria tolerogénica, suprimiendo específicamente otras células inmunitarias para mantener la homeostasis inmunitaria y prevenir la autoinmunidad (Hori, 2021; Golzari-Sorkeh y Zúñiga-Pflücker, 2023).

4. Terapia Clínica en la investigación de la tolerancia inmune periférica

Las terapias clínicas en la investigación de la tolerancia inmunitaria periférica se centran principalmente en el aprovechamiento o la modulación de las células T reguladoras (Treg) y sus mecanismos asociados para controlar las enfermedades autoinmunes, prevenir el rechazo de trasplantes y mejorar el tratamiento del cáncer.

Entre los principales enfoques terapéuticos emergentes se incluyen:

- **Vacunas tolerogénicas:** Estas vacunas buscan inducir una tolerancia inmunitaria específica al antígeno dirigiéndose a autoantígenos, promoviendo así las respuestas de las Treg o induciendo anergia en las células T autorreactivas patógenas. Algunos ejemplos incluyen vacunas de péptidos y proteínas que se están probando en enfermedades como la esclerosis múltiple (EM). Varios ensayos clínicos han demostrado seguridad y reducción de la actividad de la enfermedad,

aunque algunos ensayos han enfrentado desafíos asociados con respuestas inmunitarias adversas.

- **Terapia con células Treg:** El uso de células Treg expandidas o modificadas ex vivo para restaurar la tolerancia inmunitaria está cobrando impulso en ensayos clínicos para enfermedades autoinmunes y la enfermedad de injerto contra huésped postrasplante. Estas terapias buscan aumentar el número y la función supresora de las células Treg en los pacientes.
- **Terapias basadas en interleucina-2 (IL-2):** La interleucina-2 en dosis bajas (IL-2 LD) expande selectivamente las células Treg in vivo, mejorando así la tolerancia inmunitaria sin suprimir la función inmunitaria general. Este enfoque ha demostrado ser prometedor en estudios clínicos para diversas enfermedades autoinmunes.
- **Enfoques basados en nanopartículas:** Las nanopartículas cargadas con autoantígenos y adyuvantes tolerogénicos pueden utilizarse para dirigirse a las células dendríticas, promoviendo la inducción de células Treg y otras células inmunitarias reguladoras, aliviando así la inflamación autoinmune en estudios preclínicos y clínicos iniciales.

Estas terapias priorizan la especificidad antigénica para evitar la inmunosupresión sistémica y se centran en restablecer el equilibrio inmunitario mediante la mejora de los mecanismos de tolerancia periférica identificados mediante la investigación de las células Treg. A pesar de los avances, muchos

enfoques aún requieren mayor validación clínica para garantizar su eficacia y seguridad, y la sincronización del tratamiento, la identificación de biomarcadores y la caracterización individual de la enfermedad siguen siendo un desafío (Moorman et al., 2021; Gholijani et al., 2024; Mukherjee, 2025; Han et al., 2025).

5. El impacto del Premio Nobel en las prioridades de investigación de enfermedades autoinmunes

El Premio Nobel de 2025 se otorgará por descubrimientos relacionados con la tolerancia inmunitaria periférica y los linfocitos T reguladores, lo que se espera que cambie significativamente las prioridades de investigación en enfermedades autoinmunes. Estos objetivos abordan lo siguiente: profundizar la investigación sobre los linfocitos T reguladores (Treg) para comprender mejor cómo aprovechar o mejorar sus funciones inmunosupresoras para prevenir o tratar enfermedades autoinmunes como la diabetes tipo 1, la esclerosis múltiple y la artritis reumatoide; acelerar el desarrollo y los ensayos clínicos de terapias basadas en Treg, incluidas terapias celulares, vacunas de tolerancia y productos biológicos dirigidos a las vías de tolerancia, con el objetivo de lograr tratamientos que sean más efectivos, más duraderos y tengan menos efectos secundarios que la inmunosupresión convencional; y ampliar la investigación sobre la regulación molecular y genética de los Tregs, incluido Foxp3 y las vías relacionadas

El Premio Nobel busca identificar nuevas dianas farmacológicas y biomarcadores para la tolerancia inmunitaria y la progresión de enfermedades; investigar los mecanismos precisos de la ruptura de la tolerancia periférica para desarrollar terapias personalizadas que restablezcan el equilibrio inmunitario sin comprometer la defensa contra infecciones ni la inmunidad antitumoral; y promover enfoques interdisciplinarios que combinen la inmunología, la genómica, la epigenética y la ciencia clínica para traducir estos descubrimientos fundamentales en nuevas terapias y diagnósticos. Al destacar la importancia de la tolerancia inmunitaria periférica, es probable que el reconocimiento del Premio Nobel inspire financiación adicional, colaboraciones e investigación traslacional dirigida a las enfermedades autoinmunitarias, la modulación de la inmunoterapia contra el cáncer y la prevención del rechazo de trasplantes, con el objetivo final de transformar la evolución de los pacientes (<https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2025/popular-information/>).

Literatura citada

Brunkow ME, Jeffery EW, Hjerrild KA, Paepfer B, Clark LB, Yasayko SA, Wilkinson JE, Galas D, Ziegler SF, Ramsdell F. (2001). Disruption of a new forkhead/winged-helix protein, scurf, results in the fatal lymphoproliferative disorder of the scurfy mouse. *Nature Genetics* 27(1):68-73. doi: 10.1038/83784.

Dikiy S, Rudensky AY (2023). Principles of regulatory T cell function. *Immunity* 56:240-255.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1074761323000146> Gholijani N, Daryabor G, Kahmini FR. (2024). T cell-Intrinsic Peripheral Tolerance: A Checkpoint Target to Treat Autoimmunity. *J Cell Immunol* 6(2):87-97.

Golzari-Sorkheh M, Zúñiga-Pflücker JC. (2023). Development and function of FOXP3+ regulators of immune responses. *Clinical and Experimental Immunology* 213:13-22. <https://doi.org/10.1093/cei/uxad048>

Grover P, Goel PN and Greene MI (2021). Regulatory T Cells: Regulation of Identity and Function. *Front. Immunol.* 12:750542. doi: 10.3389/fimmu.2021.750542

Han L, Wu T, Zhang Q, Qi A, Zhou X. (2025). Immune Tolerance Regulation Is Critical to Immune Homeostasis. *Journal of Immunology Research* 2025: Article ID 5006201. <https://doi.org/10.1155/jimr/5006201>

Hori S, Nomura T, Sakaguchi S. (2003). Control of regulatory T cell development by the transcription factor Foxp3. *Science* 299(5609):1057-61. doi: 10.1126/science.1079490

Hori S. (2021). FOXP3 as a master regulatory of Treg Cells. *Nature Reviews Immunology* 21:618-619. <https://www.nature.com/articles/s41577-021-00598-9>

Moorman CD, Sohn SJ and Phee H (2021) Emerging Therapeutics for Immune Tolerance: Tolerogenic Vaccines, T cell Therapy, and IL-2 Therapy. *Front. Immunol.* 12:657768. doi: 10.3389/fimmu.2021.657768

Mukherjee A. (2025). Reprogramming immunity: Emerging therapeutic frontiers and clinical trial advances of CAR-T cell therapy in autoimmune diseases. *Clinical Immunology*

Communications 8:60-74. <https://doi.org/10.1016/j.clicom.2025.09.003>

Sakaguchi S, Sakaguchi N, Asano M, Itoh M, Toda MJ. (1995). Immunologic self-tolerance maintained by activated T cells expressing IL-2 receptor alpha-chains (CD25). Breakdown of a single mechanism of self-tolerance causes various autoimmune diseases. *Journal of Immunology* 155(3):1151-1164.

Vignali DAA, Collison LW, Workman CJ (2008). How regulatory T cells work. *Nature Reviews Immunology* 8:523-532. <https://www.nature.com/articles/nri2343>

Wildin RS, Ramsdell F, Peake J, Faravelli F, Casanova JL, Buist N, Levy-Lahad E, Mazzella M, Goulet O, Perroni L, Bricarelli FD, Byrne G, McEuen M, Proll S, Appleby M, Brunkow ME. (2001). X-linked neonatal diabetes mellitus, enteropathy and endocrinopathy syndrome is the human equivalent of mouse scurfy. *Nature Genetics* 27(1):18-20. doi: 10.1038/83707.

Portada tomada de:

Swedish Ministry for Foreign Affairs

<https://www.facebook.com/SweMFA>



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). Descubrimientos sobre la Regulación del Sistema Inmunitario: El Nobel de Fisiología o Medicina 2025. *BiotechnológicaMagazine*, 3(5), 50-55.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17582408>



El sereno y apacible estado de la necesidad

Arturo Sánchez-Paz

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

Según se dice, hay una tradición gitana en la que no se debe desear felicidad a los festejados en celebraciones importantes como cumpleaños, bodas, bautizos o graduaciones, sino “malos principios”. A lo largo de su historia el pueblo gitano ha enfrentado condiciones difíciles y discriminación, debido principalmente a su nomadismo, su origen como pueblo minoritario y los prejuicios asociados. Los gitanos saben, tras siglos de experiencia realizando desplazamientos a lugares en los que regularmente se les ha recibido con hostilidad, que la adversidad es inevitable. Por eso prefieren desear malos principios, para que los reveses ocurran al inicio de cualquier acontecimiento de la vida de la gente que aprecian, de modo que los infortunios los fortalezcan y el futuro germine en finales venturosos.

Si cualquiera hubiese sabido, en aquel momento, que a pesar de lo particularmente curioso de su vida, él llegaría a tener éxito en algún futuro, sin duda se habría sorprendido...

Su padre murió siete meses antes de su nacimiento. Al enviudar, su madre queda en el desamparo ya que las condiciones sociales de la época imponían que el marido fuera el proveedor del sustento familiar. Pese a sufrir una terrible pobreza, su madre, junto con la

paciente niñera, hacen lo imposible por cubrir las necesidades del desventurado infante irlandés. Sin embargo, probablemente debido a que las condiciones económicas de la niñera empeoran, su madre toma la decisión de enviarlo a vivir con su tío paterno, un rico comerciante de Dublín, a la edad de cuatro años. Vive, virtualmente, como un huérfano, sin el cariño y protección de sus padres y bajo la -

tutela de un desconocido. Así, los primeros años de vida de *Jonathan Swift* no fueron precisamente auspiciosos.

Cuando Jonathan cumple seis años (1673), su tío, Godwin Swift, decide cubrir los costos de los estudios del niño y lo envía al prestigioso colegio privado Kilkenny. Y una vez más, Jonathan comienza su etapa escolar con dificultades: La escuela esperaba que él hubiera aprendido previamente las declinaciones básicas en latín. Pero ningún adulto había tomado la responsabilidad de educar a Jonathan en esta materia. Algunas versiones biográficas de Jonathan Swift sugieren que pudo ingresar a esta escuela, debido a las abundantes y frecuentes aportaciones económicas que el tío entregaba a la escuela. Así, Jonathan comenzaría su primer etapa escolar con serias deficiencias.

Una muy mala conducta y su pobre desempeño como estudiante, en una escuela reconocida por sus inflexibles normas disciplinarias y su exigencia académica, provocaron que sufriera de constantes medidas correctivas. Sin embargo, dos materias en particular, literatura y oratoria, le apasionaban. Se graduó de Kilkenny sin sobresalir especialmente, pero con lo necesario para continuar sus estudios en el reputado Trinity College de Dublín al que ingresa a los 14 años.

Nuevamente, es un alumno que no se distingue por su desempeño académico y continua su rebeldía. Se ha sugerido que esta actitud era el resultado de una falta de afecto, cariño y protección durante su infancia, lo que le generó un sentimiento de vacío, baja autoestima, falta de motivación y dificultad para concentrarse.

Además, lo envolvía una exasperante estrechez económica. Sus acomodados compañeros evitan la menesterosa compañía del estudiante pobre y huérfano. Así, descuida sus estudios y es suspendido en una ocasión. Sin embargo, logra graduarse como bachiller en en Artes en febrero de 1686 con la mención *ex speciali gratia* (con favor especial), que indica que apenas cumplió con los requisitos para obtener el grado. Lo cierto es que al abandonar el Trinity College, un vacilante Jonathan era incapaz de elegir una carrera. Su desempeño académico le dificultaba acceder a una profesión que le permitiera conservar el estatus de caballero.

Si cualquiera hubiese sabido, en aquel momento, que a pesar de lo particularmente curioso de su vida, él llegaría a tener éxito en algún futuro, sin duda se habría sorprendido...

Y Jonathan tuvo la capacidad de entender que los sueños no se miden por las calificaciones escolares ni por los momentos adversos, sino que su futuro dependía de no rendirse, de combatir, de que llegarían momentos en que la fuerza para vencer se extinguiría, y entonces debería manifestar resistencia. Mario Benedetti escribió en 1999 un haiku (un género poético de origen japonés escrito, según la tradición, en tres versos sin rima, de 5, 7 y 5 sílabas, respectivamente) que describe espléndidamente la forma en la que Jonathan Swift afrontó la vida:

*quién lo diría
los débiles de veras
nunca se rinden*

El destino llevó a Jonathan por caminos inesperados. Las condiciones políticas que reinaban en ese momento, por el derrocamiento del rey James II de Inglaterra (y VII de Escocia), lo impulsan a mudarse a Inglaterra en 1688, donde encuentra empleo como secretario y asistente personal de Sir William Temple. Poco después recibe el grado de Maestría en Artes por Hart Hall College. Después de realizar varias mudanzas entre Irlanda e Inglaterra, de ordenarse como vicario, y de un desencuentro amoroso, vuelve a Inglaterra a trabajar con Temple nuevamente. Es en esa época (1704) en que publica anonimamente su primera obra, “*La batalla de los libros*”, que adquirió notoriedad inmediata. Poco a poco, pero sin discreción, empieza a usar una sátira corrosiva que ataca con humor la sociedad que lo rodea y la naturaleza humana.

En 1726 se publica su obra más famosa: *Los viajes de Gulliver*. La imagen más difundida de este libro sugiere que se trata de un cuento infantil en el que el protagonista, Lemuel Gulliver, realiza cuatro viajes en barco a tierras distantes y extrañas en las que encuentra personas pequeñísimas, gigantes de casi 30 metros de altura, intelectuales con ideas profundas (pero bastante lerdos en cuestiones prácticas), y una civilización equina culta, racional, ordenada, en la que todos entienden y aceptan la conveniencia de hacer lo correcto (por lo que no tienen leyes) y que conviven con seres humanos salvajes (los Yahoos) que sólo utilizan su inteligencia para exacerbar los vicios que la Naturaleza les dio. La realidad es que esta obra es más que un largo cuento infantil.

Es una fuerte y agria crítica contra la sociedad de su tiempo y la defectuosa condición humana. Tan pronto como los viajes de Gulliver fue publicado, las plumas escandalizadas de muchos críticos comenzaron a acusarlo de misántropo y traidor. De hecho, Jonathan menciona que escribió el libro “...*para fastidiar el mundo en lugar de distraerlo*”. *Si cualquiera hubiese sabido, en aquel momento, que a pesar de lo particularmente curioso de su vida, él llegaría a tener éxito en algún futuro, sin duda se habría sorprendido...* hoy, Jonathan Swift es reconocido como uno de los escritores angloirlandeses más importantes, considerado el maestro de la prosa satírica en lengua inglesa. Su epitafio dice “*Aquí yace el cuerpo de Jonathan Swift... donde la fiera indignación ya no puede lacerar su corazón.*”

Si cualquiera hubiese sabido, en aquel momento, que a pesar de lo particularmente curioso de su vida, eso llegaría a tener éxito en algún futuro, sin duda se habría sorprendido...

La ruta hacia la aparición de la vida, en el tenso silencio del mar, implicó una larga serie de escabrosas etapas en las que ocurrieron innumerables incrementos graduales de complejidad, primero química y posteriormente biológica. Si bien, la evidencia sugiere que la vida en la Tierra comenzó hace 4,100 millones de años (tan solo 400 millones después de que nuestro planeta se formó), la evidencia fósil más antigua (*estromatolitos*, formaciones rocosas estratificadas creadas por la actividad de colonias microbianas, principalmente cianobacterias) data de hace unos 3,500 millones de años.

Sin embargo, actualmente parece claro que estas bacterias ancestrales fosilizadas, debieron ser una forma de vida avanzada. Es decir, antes de que estas primeras bacterias habitaran nuestro planeta, debieron existir precursores celulares primitivos intermedios (conocidos como *protocélulas*) que fueron la plataforma de la que derivaron las primeras células vivas autosuficientes. Una vez que distintas formas primordiales de vida comenzaron a aparecer en la Tierra, las condiciones ambientales, y una larga y enortijada historia de interacciones biológicas, dieron origen a la compleja e inmensa diversidad biológica que ha habitado nuestro planeta. Sin embargo, debe quedar claro que la aparición de la vida fue un proceso evolutivo que implicó, en cada una de sus etapas, la perseverante y ciega acción de la *Selección Natural*. Nadie escapa de su incesante escrutinio. Ni ayer, ni hoy.

Generalmente se considera que el “*Boring Billion*” (un período de 1,000 millones de años de la historia de la Tierra, comprendido entre 1,800 y 800 millones de años atrás), fue el más aburrido de la historia de la Tierra debido a su estancamiento geobiológico. Al principio de este período, los niveles de oxígeno (O_2) atmosférico alcanzaban apenas el 10 % de los niveles actuales. Es decir, si la proporción de oxígeno en la atmósfera terrestre actual es cercana al 21 % (nitrógeno 78 %, argón 0.93% y otros gases 0.04%), entonces hace 1,800 millones de años la atmósfera terrestre contenía solo 2.1 % de O_2 . Sin embargo, mucho de ese elemento era “absorbido” en la capa superficial de los océanos y la corteza terrestre, debido a las reacciones de oxidación de los minerales que constituyen nuestro planeta. Además, ciertas

regiones del océano comenzaron a acumular sulfuro de hidrógeno, un compuesto altamente tóxico que se genera por la actividad de ciertas bacterias en ausencia de oxígeno. Y sin embargo, la vida en el medio marino estaba dominada por bacterias y arqueas (otro tipo de procariontes), que se habían adaptado bien a estas condiciones de bajos niveles de O_2 .

Entonces, hace unos 1,450 millones de años, sucedió un evento que cambiaría la vida en nuestro planeta para siempre, y que contradice la idea de que el *Boring Billion* fuera realmente aburrido. Quizá esto comenzó como un proceso infeccioso que salió mal para una pequeña bacteria patogénica capaz de respirar oxígeno (o de prescindir de él cuando fuera necesario) y bien para su hospedero, un arquea de mayor tamaño que podía vivir sin utilizar oxígeno. Quizá fue el resultado de que la limitación de nutrientes “forzó” a una diminuta bacteria a buscar refugio dentro de una arquea de mayor tamaño. Aún no queda del todo claro que presión motivo a que esto ocurriera. Lo cierto es que una bacteria (específicamente una proteobacteria), pese a muchísimas contingencias, se convirtió en hospedero permanente de una arquea. Por supuesto, es difícil suponer que esta aventura haya tenido éxito en un primer intento. Es probable que en un principio los hospederos fallecieran (algo característico en un proceso infeccioso) y con ellos las bacterias invasoras. Es también probable que las bacterias hayan sufrido el lógico ataque de la respuesta inmune de las arqueas (hoy se reconoce que un grupo de arqueas conocido como “*Asgara*”, muy relacionado a los eucariontes, posee 2,160 sistemas de defensa completos) para contrarrestar los potenciales efectos perniciosos de las bacterias.

Sin embargo, de algún modo, esta unión, que parecía condenada al fracaso, fructificó y dio origen a un organelo que sustenta la vida en la tierra: la mitocondria. Es claro que, durante la integración mitocondrial, un nuevo organismo y nivel de complejidad surgieron a partir de células que se reproducían individualmente, lo que lo califica como una de las más importantes transiciones evolutivas que hayan ocurrido en la historia de la Tierra. Por supuesto, esta relación implicó profundos cambios en los estilos de vida de sus protagonistas. Tanto la bacteria como la arquea debieron alinear sus intereses en algún momento y desarrollar sinergias basadas en sus diferentes propiedades para tener éxito. La bacteria pasó de ser un organismo libre, a tener una existencia obligadamente encadenada a su hospedero. Además, en el proceso de su “captura” el genoma de la bacteria se redujo, preservando solamente aquellos genes esenciales para realizar su función, y varios genes que codifican proteínas necesarias para la mitocondria fueron transferidos al genoma de su hospedero. Por supuesto, desde el primer momento en que la bacteria habitó en la arquea de forma exitosa y permanente, la reproducción de esta dependió, inevitablemente, de la frecuencia de reproducción de su hospedero.

*Si cualquiera hubiese sabido, en aquel momento, que a pesar de lo particularmente curioso de su vida, **eso** llegaría a tener éxito en algún futuro, sin duda se habría sorprendido...*

En 1967, la doctora Lyn Margulis, propuso la *Teoría Endosimbiótica* en la que postuló, no sin antes haber sufrido casi una docena de rechazos para su publicación en diferentes revistas, que las células eucariotas surgieron de

la relación intensa, profunda, compleja, entre un par de células procariotas simples. La primera célula eucariota se había vuelto una desconocida para ella misma, pero no había duda de que era ella. Era una sensación vívida y terriblemente extraña.

Hoy se sabe que TODAS las formas eucariotas que habitan, o han habitado, nuestro planeta surgieron de un solo ancestro común a partir de la relación que sostuvieron dos células simples y que dieron lugar a nuevas combinaciones de capacidades bioquímicas que promovieron el acceso a fuentes de nutrientes previamente inaccesibles y la diversificación biológica. Un evento “*natural*” y único (hasta la fecha no se ha reportado la ocurrencia de otro evento endosimbiótico entre dos procariontes) que sugería tener escasas probabilidades de éxito. José Saramago escribió en su magnífica obra *La Caverna* que “...los momentos no llegan nunca tarde ni pronto, llegan a su hora, no a la nuestra, no tenemos que agradecerles las coincidencias, cuando ocurran, entre lo que ellos proponían y lo que nosotros necesitábamos”.

Recientemente, un grupo de investigadores, dirigidos por la Dra. Julia Vorholt de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich (ETH Zúrich) implantaron artificialmente, en condiciones de laboratorio, la bacteria *Mycetohabitans rhizoxinica* en el hongo patógeno *Rhizopus microsporus*. Después de cierto tiempo, esta relación triunfó, de forma tal que la bacteria *M. rhizoxinica* comenzó a ser transmitida, con baja frecuencia, en las siguientes generaciones del hongo. Vale la pena mencionar que al inicio el éxito de germinación de esporas del hongo se redujo notablemente (solamente 6.3 % de las

nuevas esporas germinaban), lo que sugirió que la presencia de la bacteria impuso un costo sustancial en la adecuación biológica del hospedero. Sin embargo, con el paso del tiempo, el éxito de germinación se incrementó y alcanzó los niveles normales de las esporas sin la bacteria. Aún más, la bacteria sintetizó la toxina rizoxina en el hongo, lo que demostró la transferencia de una nueva función metabólica de la bacteria al hospedero a través de la endosimbiosis inducida. Además de que este estudio brinda oportunidades para el diseño de endosimbiontes con características deseadas y relevantes para su potencial aprovechamiento biotecnológico, permite comenzar a entender las fuerzas evolutivas que dieron forma a la endosimbiosis.

Muy temprano en la historia evolutiva de los seres humanos se despertó el apetito por obtener explicaciones que nos permitieran entender el mundo que nos rodea. Tan pronto la *Selección Natural* favoreció una capacidad cognitiva mínima, algunos seres humanos comenzaron a hacerse dos tipos básicos de preguntas: ¿por qué ocurrió eso? y ¿se puede utilizar? A través de la información que se obtenía de dichas preguntas, entendimos que nuestro mundo es extremadamente complejo, lleno de fenómenos que percibimos como confortables o temibles, extraordinarios u oscuros, y que el mundo que nos rodea puede, y debe, ser aprovechado, siempre y cuando se haga responsablemente. Muchas vicisitudes pudieron ocurrir y provocar que la vida en nuestro planeta fuera completamente diferente. Llegó el momento de ser más amables con quien nos ha dado todo.

Referencias

Giger, G.H., Ernst, C., Richter, I., Gassler, T., Field, C.M., Sintsova, A., Kiefer, P., Gäbalein, C.G., Guillaume-Gentil, O., Scherlach, K., Bortfeld-Miller, M., Zambelli, T., Sunagawa, S., Künzler, M., Hertweck, C., y Vorholt, J.A. (2024). Inducing novel endosymbioses by implanting bacteria in fungi. *Nature*, 635, 415–422. doi: 10.1038/s41586-024-08010-x.

Leão, P., Little, M.E., Appler, K.E., Sahaya, D., Aguilar-Pine, E., Currie, K., Finkelstein, I.J., De Anda, V., y Baker, B.J. 2024. Asgard archaea defense systems and their roles in the origin of eukaryotic immunity. *Nature Communications*, 15, 6386. doi: 10.1038/s41467-024-50195-2.



Sobre el autor: 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 SNII (II) y de la Academia Mexicana de Ciencias.

Cita:

Sánchez-Paz, A. (2025). El sereno y apacible estado de la necedad. *Biotecnológica Magazine*, 3(5), 56–61.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17583165>

BAJA CALIFORNIA SUR: DESTINO EMERGENTE EN TURISMO DE SALUD

**DONDE LA NATURALEZA, LA CIENCIA Y LA TRANQUILIDAD SE
UNEN PARA TU SALUD**

¿Qué es el Turismo de Salud?

Viajes con fines médicos, terapéuticos o de bienestar, aprovechando los recursos naturales, la infraestructura sanitaria y la calidad de vida de Baja California Sur.

Potencial de BCS para el Turismo de Salud

- Entorno natural privilegiado
- Calidad de vida
- Infraestructura turística consolidada
- Crecimiento del sector salud privado
- Accesibilidad global

Tipos de Turismo de Salud con Potencial en BCS

- Bienestar y relajación
- Turismo médico menor
- Rehabilitación post-operatoria
- Turismo geriátrico
- Ecoterapia y turismo de naturaleza

Datos clave y estadísticas relevantes

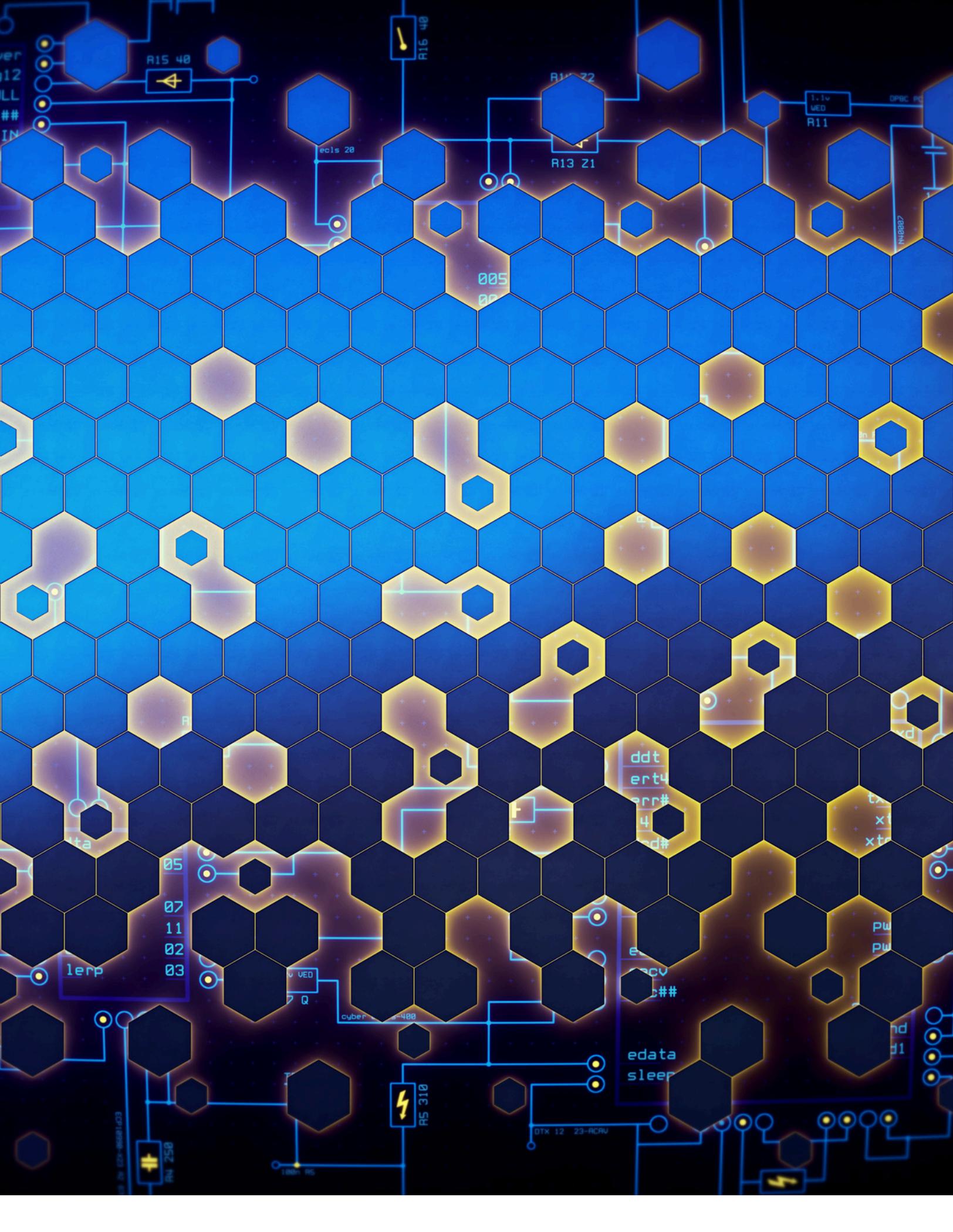
- Más de 1.5 millones turistas/año a BCS en 2023
- Origen EE.UU. y Canadá
- Mas clínicas privadas y centros de bienestar en Los Cabos y La Paz

Destinos clave dentro de BCS

Los Cabos	La Paz	Loreto	Todo Santos

Dr. Felipe Ascencio Valle y Dra. Norma Y. Hernández Saavedra

Cita:
Ascencio, F., & Hernandez Saavedra, N. Y. (2025). Baja California Sur: Destino Emergente en Turismo de Salud. Biotecnológica Magazine, 3(5), 62.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.17583219>



R15 48

R16 48

R13 21

R11

ecis 28

005
00

ddt
ert4
err#
4
ed#

ta

05
07
11
02
03

lerp

VED

Q

cyber
488

edata
sleer

R5 310

DTX 12 23-RCRU

R15 250

1000