

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Biomimética de la resistencia a la presión en organismos de las profundidades marinas para la exploración astrobiológica de océanos subterráneos en otros planetas

Ariadna Celeste Pillaca-Llanos¹

<https://orcid.org/0009-0004-9643-0140>

Sergio Felipe Serrano-Díaz¹

<https://orcid.org/0009-0002-5942-154X>

Vannesa Pachas-Polack¹

<https://orcid.org/0009-0001-0770-1497>

Rivaldo Carlos Duran-Aquino¹

<https://orcid.org/0009-0004-3638-3522>

¹Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

Email: rivaldo.duran@unmsm.edu.pe

Recibido: 01/12/2024 • Revisado: 20/12/2024 • Aceptado: 25/12/2024

Resumen

En el marco del diseño de vehículos de exploración de océanos subterráneos en cuerpos celestes como Europa y Encélado, este estudio propone un enfoque biomimético basado en organismos marinos de las profundidades, como peces invertebrados y microbios resistentes a altas presiones y bajas temperaturas. La metodología incluyó una revisión exhaustiva de las adaptaciones biológicas de estos organismos y sus aplicaciones al diseño de robots, la identificación de principios biomiméticos relevantes y el análisis de las condiciones planetarias de lunas y exoplanetas con océanos subterráneos. Los resultados demuestran que las características biomiméticas pueden mejorar la eficiencia y reducir el tamaño de los vehículos de exploración, en comparación con las tecnologías actuales. Se concluye que la aplicación de la biomimética tiene un gran potencial para la exploración astrobiológica en condiciones extremas y se recomienda fomentar investigaciones interdisciplinarias entre biología marina, astrobiología e ingeniería aeroespacial para el desarrollo futuro de tecnologías innovadoras.

Palabras clave: Astrobiología, biomimética, exoplanetas, océanos subterráneos, vehículos de exploración.

Citar como:

Pillaca-Llanos, A. C., Serrano-Díaz, S. F., Pachas-Polack, V. y Duran-Aquino, R. C. (2024). Biomimética de la resistencia a la presión en organismos de las profundidades marinas para la exploración astrobiológica de océanos subterráneos en otros planetas. *Revista Científica de Astrobiología*, 1(1), 18-30. <http://doi.org/10.69976/aspast.v1n1.3>

RESEARCH ARTICLE

Pressure-Resistance Biomimetics in Deep-Sea Organisms for Astrobiological Exploration of Subsurface Oceans on Other Planets

Ariadna Celeste Pillaca-Llanos¹

<https://orcid.org/0009-0004-9643-0140>

Sergio Felipe Serrano-Díaz¹

<https://orcid.org/0009-0002-5942-154X>

Vannesa Pachas-Polack¹

<https://orcid.org/0009-0001-0770-1497>

Rivaldo Carlos Duran-Aquino¹

<https://orcid.org/0009-0004-3638-3522>

¹Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

Email: rivaldo.duran@unmsm.edu.pe

Recibido: 01/12/2024 • Revisado: 20/12/2024 • Aceptado: 25/12/2024

Abstract

In the context of designing exploration vehicles for subsurface oceans on celestial bodies such as Europa and Enceladus, this study proposes a biomimetic approach inspired by deep-sea marine life—specifically invertebrate fish and microorganisms adapted to high-pressure, low-temperature environments. The methodology included an in-depth review of these organisms' biological adaptations and how they can inform robot design, the identification of relevant biomimetic principles, and an assessment of planetary conditions on moons and exoplanets with subsurface oceans. Findings indicate that biomimetic features can boost efficiency and reduce the size of exploration vehicles compared to current technologies. The study concludes that applying biomimicry in extreme environments holds significant promise for astrobiological exploration and recommends fostering interdisciplinary research among marine biology, astrobiology, and aerospace engineering to develop future innovations.

Keywords: Astrobiology, biomimetics, exoplanets, subsurface oceans, exploration vehicles.

Cite as:

Pillaca-Llanos, A. C., Serrano-Díaz, S. F., Pachas-Polack, V. y Duran-Aquino, R. C. (2024). Biomimética de la resistencia a la presión en organismos de las profundidades marinas para la exploración astrobiológica de océanos subterráneos en otros planetas. *Revista Científica de Astrobiología*, 1(1), 18-30. <http://doi.org/10.69976/aspast.v1n1.3>

1. Introducción

El descubrimiento de océanos subterráneos en las lunas de Júpiter (Europa, Ganímedes y Calisto) y Saturno (Encélado y Titán) ha dado lugar al surgimiento del campo de la oceanografía planetaria (Hendrix et al., 2019). Estos cuerpos celestes presentan condiciones extremas, como temperaturas muy bajas y presiones muy altas, en comparación con ambientes terrestres análogos (NASA, s.f.-a, s.f.-f). Por lo tanto, la ingeniería humana enfrenta desafíos en la exploración astrobiológica de océanos subterráneos en otros planetas en busca de condiciones óptimas para el desarrollo de la vida (Rettberg, 2022).

Explorar entornos extraterrestres, particularmente los océanos subterráneos en lunas como Europa y Encélado, presenta desafíos significativos para las tecnologías actuales de exploración espacial. Se cree que estas lunas albergan vastos océanos bajo sus costras heladas, pero poseen condiciones extremas como frío intenso, alta presión y luz limitada. Los vehículos robóticos actuales tienen dificultades con los entornos hostiles de estas lunas, y las soluciones de ingeniería tradicionales pueden no ser suficientes para abordar los desafíos únicos que presentan. Este artículo explora cómo las adaptaciones biológicas de especies marinas, como las que se encuentran en las profundidades oceánicas de la Tierra, pueden inspirar el diseño de robots biomiméticos capaces de superar estas limitaciones. El objetivo es proponer principios de diseño innovadores y nuevos métodos basados en sistemas biológicos para mejorar las capacidades de los robots de exploración espacial, especialmente en entornos como los océanos subterráneos de lunas y exoplanetas.

Inicialmente, los robots marinos tradicionales, equipados con estructuras metálicas especializadas para protección, fueron considerados la opción más viable para soportar las presiones extremas en aguas profundas (Li et al., 2023; Yoerger et al., 2021). Sin embargo, investigaciones posteriores demostraron que las especies que viven en estos entornos de presión extrema no requieren estructuras complejas o voluminosas (Smith et al., 2021). Entre estas especies se encuentran microorganismos conocidos como barófilos con potencial astrobiológico (Rampelotto, 2010); peces que sobresalen en locomoción y natación eficiente (Colgate & Lynch, 2004; Gao et al., 2013); e invertebrados con notable resistencia a la presión y excelentes capacidades de natación (Bartol et al., 2001; Z. Wang et al., 2008). Estos hallazgos llevaron a los científicos a proponer un enfoque biomimético novedoso y prometedor para la exploración espacial (Vangeli-Margariti, 2020). En apoyo de este enfoque, un grupo de científicos de la NASA ha enfatizado la importancia de realizar investigaciones básicas para identificar principios biomiméticos aplicables en este campo (Hendrix et al., 2019; Somero, 1992a, 1992b).

Actualmente, varios robots biomiméticos han sido implementados con éxito (Li et al., 2021, 2023; Phillips et al., 2018). Sin embargo, la mayoría de estos modelos, con gran resistencia a profundidades y bajas temperaturas, han sido diseñados para condiciones oceánicas terrestres, mientras que el desarrollo de vehículos submarinos para otros entornos extraterrestres está en curso (NASA, s.f.-e; NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), s.f.-a, s.f.-b). Por lo tanto, este estudio propone utilizar principios biomiméticos de organismos de aguas profundas para diseñar vehículos de exploración capaces de operar en océanos subterráneos extraterrestres, analizando las características de otros planetas y satélites del Sistema Solar, y revisando el panorama actual de la tecnología de vehículos submarinos, integrando estos hallazgos.

2. Metodología

2.1. Adaptaciones Biológicas

Para investigar el potencial de diseños biomiméticos para robots de exploración espacial, se realizó una revisión exhaustiva de la literatura científica sobre diversos organismos marinos seleccionados por su capacidad para sobrevivir en condiciones extremas como bajas temperaturas, alta presión y falta de luz. Estas especies fueron elegidas por sus adaptaciones únicas, como proteínas anticongelantes, mecanismos celulares especializados y estrategias de supervivencia en entornos de alta presión. Se analizaron y compararon características biológicas como morfología, genómica y adaptaciones fisiológicas que permiten a estos organismos habitar estos entornos, en relación con las necesidades de robots en condiciones extremas de exploración espacial. La comparación entre las características de estos organismos se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.

Comparación de Características de Organismos de Aguas Profundas

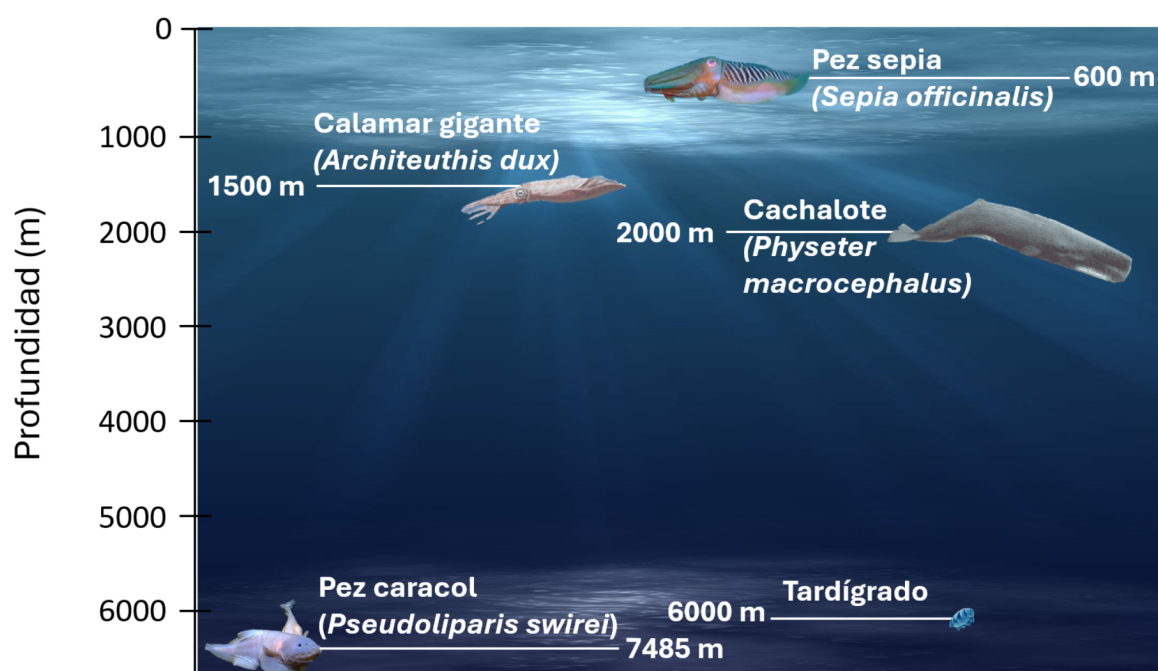
Organismo	Morfología	Genómica	Adaptaciones
Pez Baboso	Gelatinoso, órganos agrandados	Genoma grande, evolución rápida	TMAO, ácidos grasos insaturados, pérdida de genes de fotorreceptores
Calamar Gigante	Manto cónico, aletas romboidales	Epigenética, metilación	Propulsión a chorro, forma hidrodinámica
Ballena Esperma	Cabeza grande, joroba dorsal	mtDNA, sustituciones comunes	Grasa en la cabeza, arquitectura pulmonar
Sepia	Estructura eficiente, ojos complejos	Diversidad genética, estructura poblacional	HSP, hemocianina
Tardígrado	Segmentado, 8 patas, garras	Dsup, reparación de ADN	Criptobiosis, resistencia a la radiación, anhidrobiosis

- **Pez Baboso:** Este pez habita la Fosa de las Marianas a una profundidad de 6,000 metros y se caracteriza por músculos delgados y osificación parcial de los huesos. Sus adaptaciones incluyen la alteración del gen de la proteína gamma-carboxiglutamato (BGLAP) y proteínas adaptadas para la estabilidad bajo alta presión, como el óxido de trimetilamina (TMAO) (K. Wang et al., 2019).
- **Calamar Gigante:** Este cefalópodo tiene un mecanismo adaptativo llamado propulsión a chorro para moverse, alcanzando profundidades de hasta 1,500 metros. La regulación epigenética modula la expresión genética en su genoma (da Fonseca et al., 2020).
- **Ballena Esperma:** Este cetáceo se sumerge a profundidades superiores a 2,000 metros. Su cabeza grande y cuadrada le permite almacenar grasa, que se solidifica bajo presión para ayudar en su descenso. Además, su estructura pulmonar le permite soportar altas presiones (Irvine et al., 2017).

- **Sepia:** Este cefalópodo, que vive a profundidades entre 400 y 600 metros, ha desarrollado adaptaciones para sobrevivir en condiciones extremas de presión y temperatura. Estas incluyen proteínas de choque térmico (HSP), hemocianina para mejorar la oxigenación y ojos complejos para condiciones de poca luz (Zielinski et al., 2001).
- **Tardígrado:** Este microorganismo puede soportar temperaturas cercanas al cero absoluto y posee la proteína fosfatasa de doble especificidad (Dsup), que lo protege de la radiación. También tiene adaptaciones como criptobiosis y anhidrobiosis (Horikawa, 2012). Alcanza profundidades de hasta 6,000 metros bajo el nivel del mar, como se muestra en la Figura 1, junto con las profundidades alcanzadas por todos los organismos mencionados anteriormente.

Figura 1

Profundidades máximas resistidas por organismos marinos.



2.2. Principios Biomiméticos Aplicables

Los principios descritos en esta sección buscan ser replicados en robots y vehículos de exploración submarina para que, al igual que los organismos de aguas profundas, estos robots puedan soportar condiciones extremas de aguas profundas y bajas temperaturas. El enfoque está en niveles moleculares y celulares, estructura corporal y adaptaciones fisiológicas.

- **Estructura Molecular y Celular:** A este nivel, los siguientes factores permiten la supervivencia en condiciones extremas: proteínas anticongelantes (AFP), que inhiben la recristalización del hielo y tienen una diferencia entre sus puntos de fusión y congelación; glicolípidos anticongelantes (Duman, 2015); y TMAO en tejidos de peces teleósteos y crustáceos, que estabilizan moléculas celulares contra la desnaturación causada por presión extrema (Yancey et al., 2014).

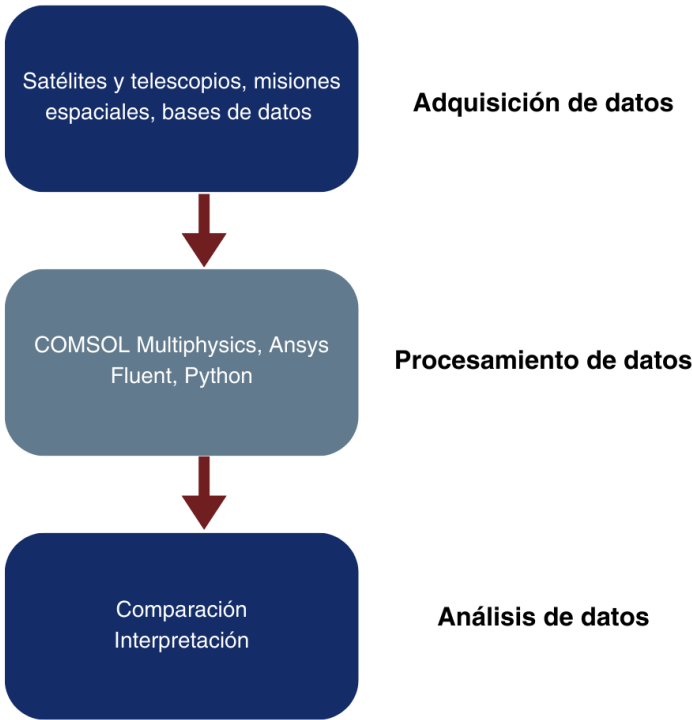
- **Estructura Corporal:** El exoesqueleto característico de algunos invertebrados (Priede, 2017), la concha de nácar de algunos moluscos y la forma del cuerpo proporcionan protección contra la presión; mientras que una gruesa capa de grasa subcutánea actúa como aislamiento térmico (Olson et al., 2012).
- **Adaptaciones Fisiológicas:** La presencia de moléculas como TMAO y proteínas anticongelantes (AFP) es clave para mantener la integridad celular. Por analogía, robots con fluidos internos diseñados para resistir congelamiento o presión podrían utilizar mezclas líquidas con propiedades anticongelantes o materiales que mantengan su flexibilidad mecánica bajo condiciones extremas (Priede, 2017).

2.3. Análisis de Condiciones Planetarias

Para evaluar la aplicabilidad de diseños biomiméticos en la exploración espacial, se estudiaron las condiciones en lunas y exoplanetas. Se recopilaron datos de investigaciones sobre organismos marinos y simulaciones de entornos subterráneos en lunas como Europa y Encélado. El objetivo fue comprender mejor los desafíos que los robots podrían enfrentar en estos lugares, considerando las similitudes entre los entornos de alta presión y baja temperatura de las profundidades marinas y los océanos subterráneos de otros cuerpos celestes.

- **Obtención de Datos:** El Telescopio Espacial Hubble (HST) y el Telescopio Espacial James Webb (JWST) se utilizan para caracterizar las atmósferas de exoplanetas y satélites como Europa y Encélado. Además, telescopios terrestres como el Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) y el Very Large Telescope (VLT) proporcionan datos complementarios sobre la química de la superficie y subsuelo de lunas y exoplanetas. Múltiples misiones han confirmado la presencia de océanos subterráneos en entornos no terrestres (la misión Galileo en Europa y la misión Cassini en Encélado), mientras que otras misiones están proyectadas para analizar cuerpos más distantes, como la misión JUICE en Ganímedes y la misión Dragonfly en Titán. El Planetary Data System (PDS) proporciona datos de misiones planetarias sobre la estructura interna, atmósferas y superficies de cuerpos como Europa, Encélado, Titán y Ganímedes. Las bases de datos Exoplanet Data Explorer y NASA Exoplanet Archive contienen información sobre exoplanetas; finalmente, bases de datos como el NASA Astrophysics Data System (ADS), Springer, Nature y ScienceDirect informan sobre océanos subterráneos de satélites, exoplanetas con condiciones análogas y entornos terrestres similares.
- **Procesamiento de Datos:** La simulación de condiciones ambientales en los océanos subterráneos de Europa y Encélado requiere software como COMSOL Multiphysics y Ansys Fluent para modelar sistemas termodinámicos y dinámica de fluidos. Mientras tanto, Python se utiliza para el procesamiento de datos, ejecución de simulaciones y visualización de resultados. Se analizan parámetros como la composición química de océanos y atmósferas para identificar compuestos clave para la vida (agua, sales, amoníaco y metano). El diagrama de flujo para el análisis se muestra en la Figura 2.

Figura 2
Diagrama de flujo para el análisis de condiciones planetarias.



3. Resultados

3.1. Comparación de Entornos: Tierra vs. Lunas y Exoplanetas

Los entornos de la Tierra tienen condiciones que, aunque variadas, tienden a ser más estables en comparación con los entornos de lunas y exoplanetas, presentando tanto desafíos como oportunidades únicas para la investigación biomimética y el desarrollo de tecnología espacial, particularmente en la exploración de océanos subterráneos (Hendrix et al., 2019). Sin embargo, algunos entornos muestran características similares entre la Tierra y otros cuerpos celestes, como se muestra en la Tabla 2. Ejemplos de esto incluyen los desiertos terrestres, que se asemejan a las condiciones en Titán y ciertos exoplanetas, y los lagos subglaciales en la Tierra, como el Lago Vostok, que tienen analogías con los océanos subterráneos en Europa y Encélado (Antunes et al., 2020; Lingam et al., 2024; Vance et al., 2018).

- **Temperatura:** Los rangos de temperatura de la Tierra permiten una amplia variedad de vida, mientras que en lunas como Europa y Encélado, así como exoplanetas como TRAPPIST-1e, estos rangos son más extremos, planteando desafíos para la habitabilidad y la tecnología de exploración.
- **Presión Atmosférica:** La presión atmosférica de la Tierra es mayor que la de otros cuerpos celestes, lo que tiene implicaciones para los robots y las tecnologías de exploración.
- **Composición Atmosférica:** La atmósfera de la Tierra, rica en oxígeno y nitrógeno,

contrasta con la de otras lunas y exoplanetas, que contienen una mezcla más diversa de gases.

- **Presencia de Agua:** La Tierra tiene agua líquida en su superficie, mientras que lunas como Europa y Encélado contienen océanos subterráneos, un escenario que requiere estrategias de exploración específicas.
- **Gravedad:** La gravedad de la Tierra es significativamente más fuerte que la de muchos cuerpos celestes, lo que impacta el diseño de robots y su capacidad para moverse a través de diferentes superficies.

Tabla 2.
Comparación de Entornos: Tierra vs. Lunas y Exoplanetas

Medida	Europa	Encélado	TRAPPIST-1e	Fosa de las Marianas	Lago Vostok
Temperatura (°C)	-160	-198	-53	2	-3
Presión (atm)	1	1	1	1100	400
Atmósfera	No densa	No densa	CO ₂ denso	—	—
Presencia de Agua	Presente	Presente	Posible	Presente	Presente
Gravedad (m/s ²)	1.31	0.113	9.4	9.8	9.8

3.2. Aplicaciones en Vehículos Espaciales

A continuación, se comparan varios robots biomiméticos con vehículos submarinos no biomiméticos (tripulados y no tripulados, autónomos o operados remotamente) en términos de tamaño, peso y profundidades alcanzadas, como se muestra en la Tabla 3.

- **Robots Biomiméticos Especializados en Océanos Extranjeros:** En el caso de explorar lunas como Europa, el NASA Buoyant Rover for Under-Ice Exploration (BRUIE) es un buen ejemplo de cómo los principios biomiméticos pueden aplicarse a la robótica para adaptarse a entornos extremos. Este robot está diseñado para operar en ambientes fríos y helados, lo que lo hace adecuado para explorar cuerpos celestes como Europa. El Exobiology Extant Life Surveyor (EELS) es otro robot biomimético desarrollado para buscar signos de vida en lugares como Encélado, basado en movilidad flexible inspirada en serpientes (NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), s.f.-b).
- **Robots Biomiméticos Especializados en Océanos Terrestres:** En la Tierra, el RoboLobster es un ejemplo de cómo se aplica la biomimética en entornos submarinos. Este robot utiliza material de nitinol, que se adapta a cambios de temperatura y es ideal para condiciones extremas (Ayers et al., 2000). De manera similar, el pez robótico blando, inspirado en el movimiento de los peces marinos, incorpora elastómeros y actuadores para moverse eficientemente a través del agua (Li et al., 2023), proporcionando un modelo útil para la exploración de océanos en otros cuerpos celestes.

- **Sumergibles Tripulados (HOVs), Vehículos Submarinos Autónomos (AUVs) y Vehículos Submarinos Operados Remotamente (ROUVs):** A diferencia de los robots biomiméticos, los vehículos tripulados, AUVs y ROUVs son más grandes y pesados, pero pueden alcanzar grandes profundidades y realizar investigaciones en los océanos subterráneos de la Tierra y otros planetas, como se refleja en la Tabla 4 (Vasudev, 2018).

Tabla 3.

Comparación de Robots Biomiméticos

Robot	Biomimética	Razón de Selección	Dimensiones	Profundidad	Ventajas
RoboLobster	Langosta	Comportamiento replicable con bibliotecas computacionales	0.6 m, 3 kg	3–12 m	Capacidad para nadar y caminar
BRUIE	Pez	Exploración submarina en aguas heladas	0.5–1 m	200 m	Exploración de Europa
EELS	Serpiente	Movimiento flexible	4.4 m, 100 kg	378 m	Potencial para Encélado
Brazo Robótico Blando	Tentáculos	Movimientos complejos	25–50 cm	2300 m	Flexible, teleoperado
Pez Robótico Blando	Liparidae	Familia que habita a mayor profundidad	22 cm	10900 m	Blando, ligero, auto-propulsado

3.3. Consideraciones para Estudios Astrobiológicos

El diseño de robots y vehículos para la exploración astrobiológica requiere herramientas que les permitan estudiar habitabilidad, bioindicadores, y los recursos necesarios para sostener la vida.

- **Capacidades de Vehículos y Robots para Estudios Astrobiológicos:** La planificación de misiones astrobiológicas depende de la capacidad de vehículos y robots para navegar en terrenos desconocidos y recolectar muestras. A través de navegación remota y sistemas de imagen avanzados como métodos LiDAR y sensores estereoscópicos, los robots pueden mapear entornos y realizar estudios astrobiológicos en planetas como Europa y Encélado (Helmick et al., 2009).
- **Biofirmas:** Las biofirmas, que incluyen tanto señales morfológicas (e.g., estromatolitos) como químicas (e.g., ácidos nucleicos, patrones de quiralidad en moléculas orgánicas), son esenciales para detectar indicios de vida pasada o presente en otros

mundos (Hays et al., 2017). Las biofirmas morfológicas, como estromatolitos o microestructuras biogénicas, señalan la actividad biológica pasada que pudo haber formado patrones característicos en rocas o sedimentos. Esto implica que un robot equipado con sistemas de imagen y análisis de microtexturas podría identificar estas estructuras sobre o bajo el hielo, o en sedimentos extraterrestres.

- **Recursos para Habitabilidad:** Los robots deben diseñarse para trabajar en entornos que pueden carecer de recursos como agua líquida o energía solar, pero que pueden contener fuentes de energía alternativas o solventes que los organismos biológicos en estos entornos utilizan para sobrevivir (Hays et al., 2017).

Tabla 4.

Comparación de Vehículos Submarinos

Vehículo	Tipo	Profundidad	Peso	Longitud
Oceanus Mini ROV	ROV	400 m	10.8 kg	52 cm
Theseus	AUV	1000 m	7940 kg	10.7 m
ROPOS	ROV	5000 m	3393 kg	3.05 m
OKPO-6000	AUV	6000 m	950 kg	3.8 m
Alvin	HOV	6500 m	20 toneladas	7 m
Jiaolong	HOV	7000 m	22 toneladas	8.3 m
Nereus	AUV	11000 m	2800 kg	4.5 m
Fendouzhe	HOV	11000 m	22 toneladas	10 m

4. Discusión

En relación con los robots que han sido construidos con el objetivo de explorar otros planetas como Marte, se tiene como ejemplo el Sojourner. Este fue lanzado en 1996 en la nave Pathfinder y es el primer vehículo de exploración espacial o rover con ruedas usado para explorar otro planeta en el Sistema Solar (NASA, s.f.-d; NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), s.f.-c). Otro robot, el Opportunity, que aterrizó en Marte en 2004 junto a un robot gemelo llamado Spirit, atravesó más de 45 km y operó durante más de 14 años, lo que lo volvió en dicho momento el rover con más recorrido (NASA, s.f.-c). Más recientemente, en 2020 fue lanzado el Perseverance con la misión de buscar rastros de vida microbiana (NASA, s.f.-b). Por otro lado, se destaca el VIPER (Volatiles Investigating Polar Exploration Rover), cuyo objetivo es la exploración lunar bajo clima extremo, terreno abrupto y luminosidad variable, aunque todavía no ha sido lanzado (NASA, s.f.-g).

El costo de realizar estas exploraciones alcanza los miles de millones de dólares y aumenta constantemente año tras año (Crawford, 2012). Estados Unidos y Rusia son los principales países con mayores capacidades espaciales técnicas para llevar a cabo estas misiones. En paralelo, la humanidad se enfrenta a desafíos sociales desde implicaciones económicas hasta cambios culturales que exigen una cooperación internacional (Shaghaghi & Antonakopoulos, 2012).

Comparando la biomimética con las soluciones actuales, se observa que un diseño inspirado en principios naturales no solo es innovador sino también más sostenible, con menores costos de desarrollo y producción. Este enfoque tiene un gran potencial para mejorar la eficiencia operativa de los vehículos de exploración espacial al reducir el peso de sus estructuras y optimizar su diseño para abordar los desafíos de la exploración astrobiológica.

Los avances biomiméticos podrían revolucionar la ingeniería de robots destinados a la exploración de océanos subterráneos en lunas y exoplanetas. Al inspirarse en las adaptaciones biológicas únicas de organismos marinos, como su capacidad para resistir condiciones extremas de presiones mayores a 600 Pa y temperaturas inferiores a -150 °C, es posible desarrollar vehículos que puedan operar en entornos donde las tecnologías actuales fracasarían. Este enfoque, que utiliza las adaptaciones naturales de los organismos, ofrece una vía innovadora para crear robots capaces de funcionar en entornos extraterrestres extremos, como los océanos subterráneos de Europa o Encélado.

Sin embargo, la implementación de estos principios biológicos enfrenta desafíos significativos. El desarrollo de materiales que puedan soportar temperaturas extremadamente bajas y presiones elevadas sigue siendo un obstáculo clave. Además, los sistemas biológicos complejos no siempre tienen un equivalente directo en ingeniería, lo que requiere más investigación y un enfoque multidisciplinario para traducir estas adaptaciones en aplicaciones prácticas de robótica espacial.

A pesar de estos desafíos, la biomimética ofrece un camino prometedor hacia el diseño de la próxima generación de vehículos de exploración espacial. La investigación futura debería centrarse en refinar estos diseños a través de simulaciones, prototipos y pruebas en condiciones extremas. Para que estos principios biomiméticos se materialicen en soluciones viables, la colaboración entre biólogos, ingenieros y científicos espaciales será crucial para superar las barreras tecnológicas y avanzar en la exploración astrobiológica.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de interés entre ellos ni con terceros.

Referencias

- Antunes, A., Olsson-Francis, K., & McGenity, T. J. (2020). Exploring deep-sea brines as potential terrestrial analogues of oceans in the icy moons of the outer solar system. *Current Issues in Molecular Biology*, 38(1), 123–126. <https://doi.org/10.21775/cimb.038.123>
- Ayers, J., Witting, J., Olcott, C., Mcgruer, N., & Massa, D. (2000). Lobster robots. *Robotics and Automation Magazine*, 5(4), 12–18.
- Bartol, I., Patterson, M., & Mann, R. (2001). Swimming mechanics and behavior of the shallow-water brief squid *Lolliguncula brevis*. *Journal of Experimental Biology*, 204(21), 3655–3682. <https://doi.org/10.1242/jeb.204.21.3655>
- Colgate, J. E., & Lynch, K. M. (2004). Mechanics and control of swimming: A review. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 29(3), 660–673. <https://doi.org/10.1109/JOE.2004.833208>
- Crawford, I. A. (2012). Dispelling the myth of robotic efficiency. *Astronomy & Geophysics*, 53(2), 2.22–2.26. <https://doi.org/10.1111/j.1468-4004.2012.53222.x>
- Da Fonseca, R. R., Couto, A., Machado, A. M., Brejova, B., Albertin, C. B., Silva, F., Gardner, P., Baril, T., Hayward, A., Campos, A., Ribeiro, Á. M.,

- Barrio-Hernandez, I., Hoving, H., Tafur-Jimenez, R., Chu, C., Frazão, B., Petersen, B., Peñaloza, F., Musacchia, F., . . . Gilbert, M. T. P. (2020). A draft genome sequence of the elusive giant squid, *Architeuthis dux*. *GigaScience*, 9(1), giz152. <https://doi.org/10.1093/gigascience/giz152>
- Duman, J. G. (2015). Animal ice-binding (antifreeze) proteins and glycolipids: An overview with emphasis on physiological function. *Journal of Experimental Biology*, 218(12), 1846–1855. <https://doi.org/10.1242/jeb.116905>
- Gao, F., Wang, Y., Wang, Z., Wang, Y., & Li, J. (2013). Prototype design of a kind of biomimetic cuttlefish underwater robot actuated by SMA wires. *Robot*, 35(3), 346. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1218.2013.00346>
- Hays, L. E., Graham, H. V., Marais, D. J. D., Hausrath, E. M., Horgan, B., McCollom, T. M., Parenteau, M. N., Potter-McIntyre, S. L., Williams, A. J., & Lynch, K. L. (2017). Biosignature preservation and detection in Mars analog environments. *Astrobiology*, 17(4), 363–400. <https://doi.org/10.1089/ast.2016.1627>
- Helmick, D., Angelova, A., & Matthies, L. (2009). Terrain adaptive navigation for planetary rovers. *Journal of Field Robotics*, 26(4), 391–410. <https://doi.org/10.1002/rob.20292>
- Hendrix, A. R., Hurford, T. A., Barge, L. M., Bland, M. T., Bowman, J. S., Brinckerhoff, W. B., Buratti, B. J., Cable, M. L., Castillo-Rogez, J. C., Collins, G. C., et al. (2019). The NASA roadmap to ocean worlds. *Astrobiology*, 19(1), 1–27. <https://doi.org/10.1089/ast.2018.1955>
- Horikawa, D. D. (2012). Survival of tardigrades in extreme environments: A model animal for astrobiology. En *Anoxia: Evidence for Eukaryote Survival and Paleontological Strategies* (pp. 205–217). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1896-8_12
- Irvine, L., Palacios, D. M., Urbán, J., & Mate, B. (2017). Sperm whale dive behavior characteristics derived from intermediate-duration archival tag data. *Ecology and Evolution*, 7(19), 7822–7837. <https://doi.org/10.1002/ece3.3322>
- Li, G., Chen, X., Zhou, F., Liang, Y., Xiao, Y., Cao, X., Zhang, Z., Zhang, M., Wu, B., Yin, S., Xu, Y., Fan, H., Chen, Z., Song, W., Yang, W., Pan, B., Hou, J., Zou, W., He, S., . . . Yang, W. (2021). Self-powered soft robot in the Mariana Trench. *Nature*, 591, 66–71. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03153-z>
- Li, G., Wong, T., Shih, B., Guo, C., Wang, L., Liu, J., Wang, T., Liu, X., Yan, J., Wu, B., Yu, F., Chen, Y., Liang, Y., Xue, Y., Wang, C., He, S., Wen, L., Tolley, M. T., Zhang, A., . . . Li, T. (2023). Bioinspired soft robots for deep-sea exploration. *Nature Communications*, 14(1), 7097. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42882-3>
- Lingam, M., Hibberd, A., & Hein, A. M. (2024). A light sail astrobiology precursor mission to Enceladus and Europa. *Acta Astronautica*, 218, 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.02.040>
- NASA. (s.f.-a). *Europa: Facts - NASA Science*. Consultado el 28 de agosto de 2024, desde <https://science.nasa.gov/jupiter/moons/europa/europa-facts/>
- NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). (s.f.-a). *BRUIE*. Consultado el 28 de agosto de 2024, desde <https://www.jpl.nasa.gov/robotics-at-jpl/bruie>
- Olson, I. C., Kozdon, R., Valley, J. W., & Gilbert, P. U. P. A. (2012). Mollusk shell nacre ultrastructure correlates with environmental temperature and pressure. *Journal of the American Chemical Society*, 134(17), 7351–7358. <https://doi.org/10.1021/ja210808s>
- Phillips, B. T., Becker, K. P., Kurumaya, S., Gruber, D. F., & Wood, R. J. (2018). A dexterous, glove-based teleoperable low-power soft robotic arm for delicate

deep-sea biological exploration. *Scientific Reports*, 8(1), 14779.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-33138-y>