

A Astrobiologia e a Busca por Vida nas Luas Congeladas: a Relevância dos Ecossistemas Hidrotermais Terrestres como Modelo Análogo

Beatriz Bagattini de Lima¹, Carlos Eduardo Malavasi Bruno²

Resumo. As luas geladas do Sistema Solar, como Europa, Encélado, Titã e Ganimedes, têm sido alvo de intenso interesse científico devido à presença confirmada ou potencial de oceanos subsuperficiais em interação com núcleos rochosos. Este artigo apresenta uma revisão de literatura sobre a habitabilidade nesses ambientes, com foco na analogia com os ecossistemas hidrotermais profundos da Terra, onde a vida se sustenta por quimiossíntese, independentemente da luz solar. A metodologia baseou-se na busca sistematizada de artigos científicos nas bases PubMed, ScienceDirect, Scopus e outras, com ênfase em estudos publicados entre 2017 e 2025. Foram selecionados nove artigos principais que abordam, de forma interdisciplinar, aspectos geoquímicos, microbiológicos, térmicos e astrobiológicos. Os resultados indicam que oceanos internos podem manter estabilidade térmica mesmo com pouco ou nenhum aquecimento por maré, e que os fluxos de calor e as plumas superficiais podem ser acessados por futuras missões com sondas miniaturizadas. Conclui-se que os mundos gelados não apenas oferecem condições plausíveis para a vida microbiana, mas também oportunidades práticas de investigação direta, desde que se observem protocolos rigorosos de proteção planetária. A convergência entre ciência planetária, geofísica e microbiologia extrema reforça o valor da astrobiologia como campo integrador na busca por vida fora da Terra.

Palavras-chave: Astrobiologia. Luas Congeladas. Fontes Hidrotermais. Vida Microbiana.

DOI:10.21472/bjbs.v12n27-015

Submitted on:
7/17/2025

Accepted on:
7/22/2025

Published on:
8/6/2025



Open Access
Full Text Article



Astrobiology and the Search for Life on Icy Moons: The Relevance of Terrestrial Hydrothermal Ecosystems as an Analogue Model

Abstract. The icy moons of the Solar System, such as Europa, Enceladus, Titan, and Ganymede, have attracted growing scientific attention due to the confirmed or potential presence of subsurface oceans interacting with rocky cores. This article presents a literature review on habitability in these environments, focusing on analogies with Earth's deep-sea hydrothermal ecosystems, where life thrives through chemosynthesis, independent of sunlight. The methodology involved a systematic search across databases like PubMed, ScienceDirect, and Scopus, emphasizing articles published between 2017 and 2025. Nine main studies were selected, covering geochemical, microbiological, thermal, and astrobiological aspects. The findings suggest that subsurface oceans may maintain thermal stability even with minimal tidal heating, and that surface plumes and heat fluxes may be accessible to future missions using miniaturized probes. It is concluded that icy worlds not only offer plausible conditions for microbial life but also practical opportunities for direct investigation, provided that strict planetary

¹ Sociedade Paulista de Medicina Veterinária (SPMV), São Paulo, São Paulo, Brasil. E-mail: biabagattini@hotmail.com

² Sociedade Paulista de Medicina Veterinária (SPMV), São Paulo, São Paulo, Brasil. E-mail: sharkeduardo@gmail.com

protection protocols are followed. The convergence of planetary science, geophysics, and extremophile microbiology reinforces astrobiology as an integrative field in the search for life beyond Earth.

Keywords: Astrobiology. Icy Moons. Hydrothermal Vents. Microbial Life.

Astrobiología y la Búsqueda de Vida en Lunas Heladas: La Relevancia de Los Ecosistemas Hidrotermales Terrestres como Modelo Analógico

Resumen. Las lunas heladas del Sistema Solar, como Europa, Encélado, Titán y Ganimedes, han despertado un creciente interés científico debido a la presencia confirmada o potencial de océanos subterráneos en contacto con núcleos rocosos. Este artículo presenta una revisión bibliográfica sobre la habitabilidad en estos entornos, centrándose en la analogía con los ecosistemas hidrotermales profundos de la Tierra, donde la vida se sostiene mediante quimiosíntesis, sin depender de la luz solar. La metodología se basó en búsquedas sistemáticas en bases de datos como PubMed, ScienceDirect y Scopus, con énfasis en estudios publicados entre 2017 y 2025. Se seleccionaron nueve artículos principales que abordan, de forma interdisciplinaria, aspectos geoquímicos, térmicos, microbiológicos y astrobiológicos. Los resultados indican que los océanos internos pueden mantener estabilidad térmica incluso con poco calentamiento por marea, y que las plumas superficiales y los flujos de calor podrían explorarse con sondas miniaturizadas. Se concluye que las lunas heladas no solo ofrecen condiciones plausibles para la vida microbiana, sino también oportunidades prácticas de investigación directa, siempre que se respeten estrictos protocolos de protección planetaria. La convergencia entre la ciencia planetaria, la geofísica y la microbiología extrema refuerza el valor de la astrobiología como campo integrador en la búsqueda de vida más allá de la Tierra.

Palabras clave: Astrobiología. Lunas Congeladas. Fuentes Hidrotermales. Vida Microbiana.

INTRODUÇÃO

A probabilidade de existência de vida fora do planeta Terra têm sido pauta de debates e estudos há mais de duas décadas, tendo em vista os corpos celestes que apresentam indícios de água, sendo esse o componente básico para que a vida aconteça. Porém, a teoria de que oxigênio também era uma necessidade para a vida foi refutado (Corliss et al., 1979).

Até os anos 80, havia especulações sobre a possibilidade de existência de vida em águas profundas do oceano, porém não havia comprovações para tal, e até mesmo o grande naturalista Edward Forbes (Anderson; Rice, 2006) afirmava que zonas abaixo de 550 metros eram áreas sem existência de vida. Entretanto, de acordo com Corliss, Baross e Hoffman (1981), as fontes hidrotermais, descobertas em 1979, proporcionam todas as condições necessárias para a existência de vida.

Fontes hidrotermais são sistemas geológicos localizados em zonas de atividade tectônica, particularmente ao longo das dorsais meso-oceânicas. Nessas regiões, a água do mar infiltra-se no leito oceânico, é aquecida pelo magma e retorna à coluna d'água carregada de compostos reduzidos, como sulfeto de hidrogênio (H₂S) e metano (CH₄). Essa energia química é utilizada por microrganismos

quimiossintéticos, os quais formam a base de uma cadeia trófica complexa que sustenta uma diversidade surpreendente de organismos, incluindo moluscos, crustáceos, anelídeos e peixes (Van Dover, 2000).

Esse modelo biológico é particularmente relevante para a astrobiologia, pois oferece uma analogia direta com ambientes extraterrestres, especialmente com luas congeladas do Sistema Solar, como Europa (lua de Júpiter) e Encélado (lua de Saturno). Ambas apresentam evidências de oceanos subsuperficiais em contato com núcleos rochosos, condições que poderiam favorecer a existência de fontes hidrotermais análogas às da Terra (Waite et al., 2009; Hand et al., 2009).

A presença de água líquida, uma fonte de energia química e moléculas orgânicas (os três requisitos básicos para a vida como conhecemos) tornam essas luas alvos prioritários nas missões astrobiológicas futuras, como a missão Europa Clipper (NASA) e JUICE (ESA). Os ecossistemas das fontes hidrotermais terrestres funcionam, portanto, como laboratórios naturais que permitem estudar possíveis biologias alternativas, baseadas em energia química em vez de fotossíntese, e capazes de sobreviver sob alta pressão, temperatura e ausência de luz.

Assim, o estudo das fontes hidrotermais e seus ecossistemas associados contribui não apenas para a biologia terrestre, mas amplia as perspectivas da astrobiologia, oferecendo parâmetros observacionais e biogeoquímicos para a detecção de vida em outros corpos celestes. O trabalho tem como objetivo reunir as informações atuais sobre estudos de astrobiologia, com foco em seres marinhos extremófilos e sua possível existência em Luas Congeladas no Sistema Solar.

REFERENCIAL TEÓRICO

A astrobiologia é um campo multidisciplinar que visa compreender a origem, evolução, distribuição e futuro da vida no universo. De acordo com Des Marais et al. (2008), essa área “une esforços da biologia, geologia, química e ciências planetárias para explorar as possibilidades de vida fora da Terra”. Uma das premissas da astrobiologia é que a vida pode surgir em ambientes extremos, desde que haja três elementos básicos: água líquida, fonte de energia e compostos orgânicos (Hand et al., 2009).

Durante muito tempo, acreditou-se que a luz solar e o oxigênio eram indispensáveis para a manutenção da vida. No entanto, essa concepção foi desafiada com a descoberta de fontes hidrotermais no fundo dos oceanos, onde organismos vivem sem qualquer contato com a luz solar, baseando-se unicamente em energia química — um processo chamado quimiossíntese (Corliss et al., 1979).

De acordo com Baross e Hoffman (1985), os sistemas hidrotermais profundos "podem sustentar comunidades microbianas autônomas baseadas na oxidação de compostos inorgânicos reduzidos, como o sulfeto de hidrogênio, em vez da fotossíntese".

Esses ambientes marinhos profundos são hoje considerados análogos potenciais para ambientes extraterrestres, principalmente nos oceanos subterrâneos das luas congeladas. Hand e Chyba (2007), afirmam que “a energia necessária para sustentar a vida microbiana poderia derivar de processos geoquímicos análogos aos que ocorrem nas fontes hidrotermais terrestres”.

As luas geladas do Sistema Solar, como Europa, Encélado, Titã e Ganimedes, vêm sendo reconhecidas como ambientes com alto potencial astrobiológico devido à presença de oceanos subsuperficiais em interação com núcleos rochosos, favorecendo processos hidrotermais semelhantes aos encontrados na Terra (DORAN et al., 2024; KIMURA, 2024).

Modelos geofísicos indicam que a manutenção desses oceanos pode ocorrer mesmo sob baixos níveis de aquecimento por maré, desde que haja propriedades físicas adequadas na crosta de gelo (KIMURA, 2024), enquanto simulações térmicas e dinâmicas mostram que a convecção interna e as transições de fase entre gelo e água influenciam diretamente a formação do relevo superficial dessas luas (KVORKA; ČADEK, 2024).

No contexto biológico, as evidências obtidas por missões espaciais indicam que plumas ricas em compostos orgânicos podem fornecer acesso direto a ambientes oceânicos, viabilizando estratégias de exploração como sondas miniaturizadas e propulsão por vela a laser (LINGAM et al., 2024).

Paralelamente, estudos em ambientes análogos na Terra, como os campos hidrotermais do Woodlark Basin, têm revelado rotas de dispersão e diversidade biológica em ecossistemas profundos, reforçando a relevância da Terra como modelo para a vida em ocean worlds (BOULART et al., 2022).

Assim, a convergência entre observações planetárias, modelagens térmicas e dados ecológicos terrestres fortalece a hipótese de que luas geladas podem não apenas ser habitáveis, mas acessíveis a investigações biológicas diretas nas próximas décadas.

METODOLOGIA

Este artigo trata-se de uma revisão de literatura narrativa, com enfoque exploratório, fundamentada em estudos científicos pioneiros e recentes que abordam aspectos da astrobiologia, especialmente relacionados à possibilidade de vida em luas geladas do Sistema Solar e sua correlação com ecossistemas hidrotermais terrestres. A revisão tem como objetivo sintetizar o conhecimento disponível, identificar lacunas teóricas e destacar tendências de investigação sobre ambientes extremos com potencial habitável.

A seleção dos materiais foi realizada entre os meses de janeiro à julho de 2025, utilizando as seguintes bases de dados científicas: PubMed, ScienceDirect (Elsevier), SpringerLink, Scopus, Web of Science e Google Scholar. Os descritores utilizados incluíram termos em português e inglês, tais como:

astrobiologia, luas geladas, Europa, Encélado, fontes hidrotermais, extremófilos, icy moons, fontes hidrotermais.

Os critérios de inclusão contemplaram: (i) artigos científicos publicados entre 2017 e 2025; (ii) textos revisados por pares; (iii) acesso completo ao conteúdo em formato PDF; (iv) abordagem direta sobre potencial de vida microbiana em ambientes extraterrestres; (v) estudos geofísicos, geoquímicos e biológicos com enfoque em análogos terrestres. Foram também utilizados documentos clássicos e anteriores a 2020, desde que fundamentais para o entendimento histórico do tema.

Ao todo, foram selecionados nove artigos principais como base central da discussão, complementados por referências adicionais para contextualização e aprofundamento. O conteúdo foi analisado de forma crítica, buscando identificar pontos de convergência entre as áreas de ciência planetária, microbiologia extrema e geologia submarina, compondo uma base interdisciplinar.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos estudos selecionados revelou um crescente interesse científico em luas geladas como Europa, Encélado, Titã e Ganimedes, cuja composição interna favorece a hipótese de habitabilidade potencial em oceanos subterrâneos. Os modelos geofísicos e geoquímicos encontrados na literatura apontam para a existência de processos hidrotermais análogos aos da Terra, o que confere viabilidade à presença de nichos biológicos sustentados por quimiossíntese, sem dependência de luz solar (KIMURA, 2024; KVORKA; ČADEK, 2024).

O artigo de Doran et al. (2024) destaca a importância da revisão das diretrizes da COSPAR para missões a corpos gelados, indicando que a definição de "mundos potencialmente habitáveis" deve ser ampliada para incluir quaisquer objetos com camadas de gelo superiores a 50% do volume externo. Esse posicionamento reforça a necessidade de abordagens protetivas para ambientes onde a vida microbiana possa existir mesmo em condições extremas.

Estudos como os de Kimura (2024) mostraram que oceanos internos podem ser sustentados por calor residual e propriedades físicas do gelo, mesmo na ausência de aquecimento por maré, especialmente se a viscosidade do gelo for elevada. Isso amplia significativamente a janela de habitabilidade de corpos como Europa. De forma complementar, Kvorka e Čadek (2024) demonstraram que o relevo superficial dessas luas pode refletir os padrões de convecção oceânica interna, sugerindo uma dinâmica térmica ativa com implicações astrobiológicas.

No campo da astrobiologia aplicada, o trabalho de Lingam et al. (2024) propôs o uso de missões baseadas em propulsão por vela a laser e sondas miniaturizadas para acessar diretamente as plumas de Europa e Encélado, ressaltando que essas estruturas representam janelas naturais para análises químicas

de oceanos internos. Tais estratégias são fundamentais para evitar perfurações destrutivas e reduzir riscos de contaminação cruzada.

Por outro lado, a analogia com ecossistemas terrestres fornece suporte teórico e empírico para tais hipóteses. O estudo de Boulart et al. (2022), que investigou o campo hidrotermal La Scala no Pacífico Sul-Occidental, identificou alta biodiversidade e mecanismos de dispersão faunística em ambientes abissais. Isso reforça a ideia de que, mesmo isolados e sob pressões extremas, ecossistemas quimiossintéticos podem sustentar redes biológicas complexas, o que contribui para modelar cenários astrobiológicos plausíveis.

Portanto, os resultados discutidos na literatura indicam que a interdisciplinaridade entre geofísica, biologia extrema e ciência planetária é essencial para avançar na compreensão da vida fora da Terra. O cruzamento de evidências obtidas em ambientes extremos da Terra com dados observacionais e modelagens planetárias sustenta a hipótese de que as luas geladas podem abrigar vida microbiana, e que estão entre os alvos mais promissores da astrobiologia contemporânea.

CONCLUSÃO

O trabalho evidenciou que a combinação de fatores como presença de água líquida, atividade geológica, energia química e compostos orgânicos torna as luas geladas do Sistema Solar, especialmente Europa e Encélado, alvos altamente promissores para a pesquisa astrobiológica. O acúmulo de dados observacionais, modelos térmicos e investigações geoquímicas tem fortalecido a hipótese de que esses ambientes possam sustentar formas de vida baseadas em quimiossíntese, à semelhança do que ocorre em fontes hidrotermais submarinas terrestres.

Os estudos analisados demonstram uma clara convergência entre a geofísica planetária, a microbiologia extrema e a astrobiologia aplicada, revelando que oceanos subterrâneos podem manter condições de estabilidade energética e química por longos períodos, mesmo na ausência de luz solar ou de atmosfera densa. Além disso, a analogia com ecossistemas marinhos profundos, como o campo hidrotermal La Scala, oferece evidências empíricas que apoiam a possibilidade de vida em ambientes extremos, reforçando o valor da Terra como modelo de referência.

Conclui-se, portanto, que os avanços científicos e tecnológicos recentes não apenas ampliaram o entendimento sobre a habitabilidade em mundos gelados, como também abriram caminhos concretos para missões de exploração seguras e eficazes, capazes de acessar oceanos internos por meio da análise de plumas ou da interpretação geofísica da superfície. A continuidade dessas investigações, aliada a políticas responsáveis de proteção planetária, será essencial para garantir o sucesso ético e científico das futuras buscas por vida extraterrestre.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, T. R.; RICE, T. Deserts on the sea floor: Edward Forbes and his azoic hypothesis for a lifeless deep ocean. *Endeavour*, v. 30, n. 4, p. 131–137, dez. 2006.
- BAROSS, JOHN A.; HOFFMAN, SARAH E. Submarine hydrothermal vents and associated gradient environments as sites for the origin and evolution of life. *Origins of Life*, p. 327–345, 1985.
- BOULART, C. et al. Active hydrothermal vents in the Woodlark Basin may act as dispersing centres for hydrothermal fauna. *Communications Earth & Environment*, v. 3, n. 1, p. 64, 17 mar. 2022.
- CORLISS, J. B.; BAROSS, J. A.; HOFFMAN, S. E. An hypothesis concerning the relationship between submarine hot springs and the origin of life on Earth. *Oceanologica Acta*, p. 59–69, 1981.
- CORLISS, JOHN B. et al. Submarine Thermal Springs on the Galapagos Rift. *Science*, v. 23, n. 4385, p. 1073–1083, 16 mar. 1979.
- DES MARAIS, D. J. et al. The NASA Astrobiology Roadmap. *Astrobiology*, v. 8, n. 4, p. 715–730, ago. 2008.
- DORAN, P. T. et al. The COSPAR planetary protection policy for missions to Icy Worlds: A review of history, current scientific knowledge, and future directions. *Life Sciences in Space Research*, v. 41, p. 86–99, maio 2024.
- HAND, K. P.; CARLSON, R. W.; CHYBA, C. F. Energy, Chemical Disequilibrium, and Geological Constraints on Europa. *Astrobiology*, v. 7, n. 6, p. 1006–1022, dez. 2007.
- HAND, KEVIN P. et al. Astrobiology and the Potential for Life on Europa. p. 589–629.
- KIMURA, J. Europa's structural conditions for the existence of subsurface ocean and the absence of metallic core-driven magnetic field. *Planetary and Space Science*, v. 243, p. 105868, abr. 2024.
- KIVELSON, M. G. et al. Galileo Magnetometer Measurements: A Stronger Case for a Subsurface Ocean at Europa. *Science*, v. 289, n. 5483, p. 1340–1343, 25 ago. 2000.
- KVORKA, J.; ČADEK, O. The role of subsurface ocean dynamics and phase transitions in forming the topography of icy moons. *Icarus*, v. 412, p. 115985, abr. 2024.
- LINGAM, M.; HIBBERD, A.; HEIN, A. M. A light sail astrobiology precursor mission to Enceladus and Europa. *Acta Astronautica*, v. 218, p. 251–268, maio 2024.
- POSTBERG, F. et al. Macromolecular organic compounds from the depths of Enceladus. *Nature*, v. 558, n. 7711, p. 564–568, 27 jun. 2018.
- VAN DOVER, C. L. The ecology of deep-sea hydrothermal vents. Princeton University Press, p. 2094, 2000.
- WAITE JR, J. H. et al. Liquid water on Enceladus from observations of ammonia and ^{40}Ar in the plume. *Nature*, v. 460, n. 7254, p. 487–490, 23 jul. 2009.