

# Habitabilidade em luas de sistemas planetários: uma nova fronteira

Eduardo Janot Pacheco e Vitória Bellecerie da Fonseca

Universidade de São Paulo

---

## Resumo

Os voos espaciais realizados nas décadas 80-2000 trouxeram imensos progressos em nossos conhecimentos sobre as condições físicas e químicas existentes nas grandes luas dos planetas gigantes gasosos do Sistema Solar. Sobrevoos próximos sobretudo de Titan, Europa e Enceladus revelaram características surpreendentes sobre essas luas e permitiram compor um quadro bastante detalhado de suas superfícies e interiores e da atmosfera, no caso de Titan. A descoberta de oceanos interiores em praticamente todas as grandes luas de Saturno e Júpiter abriu a extraordinária perspectiva de poder existir vida extremófila nesses locais, algo desconhecido antes. Neste artigo, apresentamos características, sobretudo sobre essas três luas, e argumentos que defendem essa tese: uma nova zona de habitabilidade parece existir nos satélites rochosos de exoplanetas gigantes gasosos, multiplicando a possibilidade de existir vida extremófila através da Via Láctea.

## Abstract

Space flights carried out in the 80-2000s brought immense advances in our knowledge of the physical and chemical conditions existing in large moons of the gas giant planets in the Solar System. Close flybys, especially of Titan, Europa and Enceladus revealed surprising features in these moons and made it possible to compose a very detailed picture of their surfaces and interiors and of the atmosphere, in the case of Titan. The discovery of subsurface oceans in almost all the large moons of Saturn and Jupiter opened up the extraordinary prospect that extremophile life could exist in these places, something previously unknown. In this article, we present characteristics, especially about these three moons, and arguments that defend this thesis: a new habitability zone seems to exist in the rocky satellites of gas giant exoplanets, multiplying the possibility of extremophile life across the Milky Way.

---

**Palavras-chave:** habitabilidade, sistema solar, condições para a vida.

**Keywords:** habitability, solar system, conditions for life.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38804](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38804)

## 1 Introdução

A vida, como a conhecemos na Terra, existe e se desenvolve graças à proteção da atmosfera. Entre outras vantagens, ela impede que radiações nocivas vindas do Sol e da Via Láctea atinjam o planeta e assegura, na superfície, temperaturas adequadas à sua sobrevivência por meio do efeito estufa. Por essa razão, até anos recentes, o foco principal das pesquisas sobre habitabilidade em ambientes extraterrestres se concentrou em exoplanetas e no conceito de Zona Habitável (ZH), a região em torno de uma estrela onde a temperatura na superfície de um planeta com atmosfera permite a existência de água (H<sub>2</sub>O) em estado líquido (ver Ref. [1] e suas referências). Essa ZH é também chamada de planetária ou radiativa,

sendo calculada de modo que, em suas bordas interior e exterior, as temperaturas extremas do planeta sejam de 100 °C e 0 °C, respectivamente. Calcular uma ZH é tarefa bastante complexa, pois envolve, entre outros fatores, a presença de uma atmosfera [2].

O conceito de habitabilidade utilizado acima é, na verdade, claramente antropocêntrica, já que supõe que a vida extraterrestre requer meios e condições semelhantes aos dos organismos terrestres como, por exemplo, a presença de H<sub>2</sub>O como solvente para assegurar as reações químicas entre moléculas orgânicas. Os reais limites para a vida cósmica são desconhecidos, mas a hipótese de condições similares às da Terra, apesar de limitada, é um início razoável para um estudo sobre habitabilidade já que, até que se possua



**Figura 1:** Registro de Io pela sonda Galileo, mostrando grandes erupções vulcânicas. Fonte: NASA/JPL/University of Arizona.

dados detalhados sobre outros planetas habitados, as discussões sobre vida extraterrestre são necessariamente enviesadas, por serem baseadas em nossa experiência terrestre. Acredita-se hoje que, num passado remoto da Terra, substâncias pré-bióticas reagiram espontaneamente em meio aquoso para sintetizar moléculas mais complexas, chegando finalmente ao RNA e DNA, componentes celulares indispensáveis para todo tipo de vida conhecida (ver, por exemplo, Ref. [3]).

Planetas massivos, inclusive os gigantes gasosos, tendem a ter mais satélites, em decorrência do processo de formação por acreção, e isso deve ter sucedido igualmente com exoplanetas, fora do Sistema Solar. Em um sistema dinâmico de N-corpos, ocorrem interações gravitacionais que podem produzir órbitas com ressonâncias. Objetos ressonantes estão sujeitos a um padrão de movimentação específico ao redor do corpo principal, neste caso um planeta, e a marés gravitacionais que variam de maneira periódica, com a consequente geração de energia na forma de calor. Io, o menor dos satélites galileanos do Júpiter, tem seu interior fortemente aquecido, e isso se manifesta na forma dos maiores e mais intensos vulcões do Sistema Solar, com ejeções de matéria até quase 200 km de altura, como mostra a Figura 1.

A partir do final do século XX, observações do solo com grandes telescópios e do telescópio espacial Hubble (1990-) permitiram uma nova fronteira no estudo de objetos do Sistema Solar. Mais ainda, sondas espaciais enviadas para os planetas



**Figura 2:** Quantidade de água em relação ao volume total e à massa dos oceanos terrestres de corpos oceânicos do Sistema Solar. Créditos: PHL/UPR Arcibo, NASA; via [Our Planet – pale blue dot](#), traduzida pelos autores.

mais distantes possibilitaram a procura por condições de habitabilidade fora da Terra. Podem ser citadas as missões Pioneer 10 (1973), Pioneer 11 (1974) e Voyager 1 e Voyager 2, de 1979, que cruzaram o sistema de Júpiter, trazendo pela primeira vez maiores detalhes sobre seus satélites por meio de *flybys*, isto é, voos muito próximos. Em particular, com a sonda Galileo (1989-2003), da agência espacial estadunidense NASA, foi feito um estudo mais detalhado acerca da atividade vulcânica de Io, a possibilidade de Europa conter água em estado líquido, a superfície com muitas crateras de Calisto e o campo magnético de Ganimedes. Atualmente, a sonda Juno (NASA, 2011-) está explorando o planeta gigante. Já para o sistema de Saturno, a missão Cassini-Huygens (1997-2017), parceria entre as agências italiana ASI, europeia ESA e a NASA, foi essencial para a descoberta e observação de diversas luas, bem como os anéis do planeta. O *lander* Huygens inclusive pousou na lua Titan em 2005, investigando sua atmosfera e composição superficial.

Assim, diversas luas, nas quais confirmou-se a presença de oceanos salgados abaixo de suas superfícies geladas, foram classificadas como “Mundos Oceânicos”, como mostra a Figura 2, com o volume e porcentagem em massa de água líquida em cada corpo, em comparação à Terra. De fato, existe tal estrutura nos satélites de Júpiter (e.g., Europa, Ganimedes e Calisto) e de Saturno (Titan e Enceladus, por exemplo) [4]. Na Tabela 1, mostramos uma comparação entre parâmetros físicos (raio equatorial, massa, densidade média e gravidade superficial) de Europa, Titan, Enceladus e Lua.

Titan possui até mesmo grandes lagos, prova-

**Tabela 1:** Parâmetros físicos e de massa dos satélites analisados neste artigo: Europa, Titan e Enceladus, e da Lua.

Parâmetro	Europa	Titan	Enceladus	Lua
Raio equatorial	1560,8 km	2575,0 km	252,1 km	1738,1 km
Massa	$4,80 \cdot 10^{22}$ kg	$1,34 \cdot 10^{23}$ kg	$1,08 \cdot 10^{20}$ kg	$7,35 \cdot 10^{22}$ kg
Densidade média	3010 kg/m <sup>3</sup>	1881 kg/m <sup>3</sup>	1610 kg/m <sup>3</sup>	3344 kg/m <sup>3</sup>
Gravidade superficial	1,310 m/s <sup>2</sup>	1,35 m/s <sup>2</sup>	0,113 m/s <sup>2</sup>	1,620 m/s <sup>2</sup>
Referências	[5, 6]	[5, 7]	[7, 8]	[9]

velmente compostos por etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>). Tanto este satélite como Enceladus possuem grandes reservatórios de líquido em seus interiores, aquecidos por marés gravitacionais, compostos orgânicos e atividade geológica [10]. Por sua vez, os dados mais precisos de Europa até o momento foram obtidos pela Galileo, que encontrou semelhanças nessa lua com a Groenlândia, ainda que um defeito em uma das antenas tenha prejudicado a qualidade das imagens produzidas.

Garcia-Lopez & Cid mostraram que o interior destas luas geladas são ambientes semelhantes aos glaciares terrestres e ao continente antártico, e são os locais mais favoráveis para a vida no Sistema Solar [11]. Em particular, supõe-se que, tanto em Enceladus como em Europa, o oceano está em contato com o fundo sólido dos corpos, de modo que pode haver a formação de fontes hidrotermais, isto é, as chaminés oceânicas existentes no fundo do mar na Terra e que abrigam uma fauna exuberante de vida microbiana e também multicelular.

Podemos dizer então que, nos sistemas planetários de planetas gigantes, pode existir também uma Zona Habitável, circumplanetária e ocupada por satélites. As luas Europa, Titan e Enceladus serão abordadas em mais detalhe neste artigo sobre suas condições de habitabilidade.

## 2 Os extremófilos terrestres

Os extremófilos terrestres são microorganismos, bactérias e arqueas, capazes de viver em ambientes com condições extremas, seja de temperatura (acima de 100 °C ou abaixo de 0 °C), pH (abaixo de 1 ou acima de 10, muito ácido ou muito alcalino, respectivamente), em condições de salinidade quase saturada ou de pressão (acima de 100 MPa) [12]. Essas são condições extremamente distantes da zona de

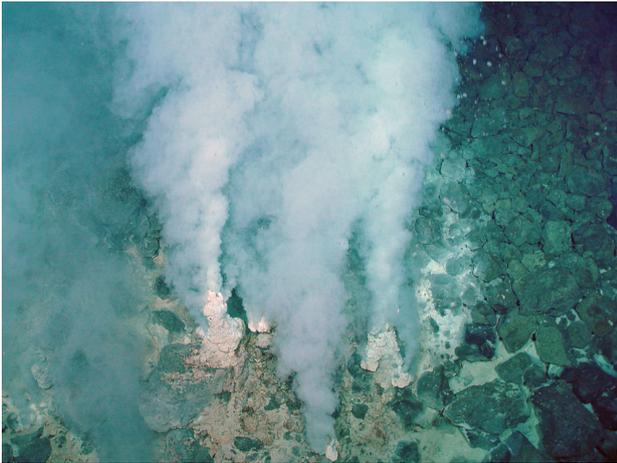
conforto de organismos mesofílicos como nós e boa parte dos seres multicelulares com os quais convivemos. Os extremófilos ocupam praticamente todos os ambientes terrestres e participam de importantes ciclos biogeoquímicos, de modo que há indicadores de que a vida não é algo frágil como se considerada até há pouco [13], mas é um fenômeno robusto e prolífico, dadas algumas condições mínimas do ambiente.

A constatação de que os organismos extremófilos podem viver numa larga gama de condições físicas e químicas os tornam candidatos naturais a habitarem ambientes extraterrestres inóspitos para o ser humano, como os oceanos interiores das luas dos planetas gigantes. Acredita-se que existem, pelo menos em Enceladus e Europa, fontes hidrotermais no fundo oceânico semelhantes às existentes em nosso planeta (Figura 3), em torno das quais seres resistentes a altas pressões e temperaturas foram encontrados [14].

Nas regiões de atividade vulcânica por fontes hidrotermais, a água do mar infiltra no manto terrestre através de rachaduras e rochas porosas, sendo aquecida pelo magma. Assim, ocorrem reações químicas, como a serpentinização, aquecendo o ambiente ao redor para até 400 °C. Gases metano (CH<sub>4</sub>) e hidrogênio molecular (H<sub>2</sub>) são liberados na água, fontes de energia que podem ser utilizadas por organismos quimiossintéticos. Tais ecossistemas de serpentinização são importantes análogos para ecossistemas supostos para Terra e Marte primitivos [15].

Há precipitação de minerais, formando torres de estruturas similar a chaminés. Na Figura 3, um ambiente de cerca de 90 °C e pH alcalino na faixa 9-11, dominado, por exemplo, pelo grupo de arqueas da ordem *Methanosarcinales* [16, 17].

A área ao redor das fontes hidrotermais constitui um cenário para uma “teia” alimentar única, mantida por microorganismos que obtêm energia da oxidação do enxofre e outros compostos, pro-



**Figura 3:** Chaminé branca no anel de fogo submarino no Arco das Marianas, Oceano Pacífico. Créditos: NOAA Office of Ocean Exploration.

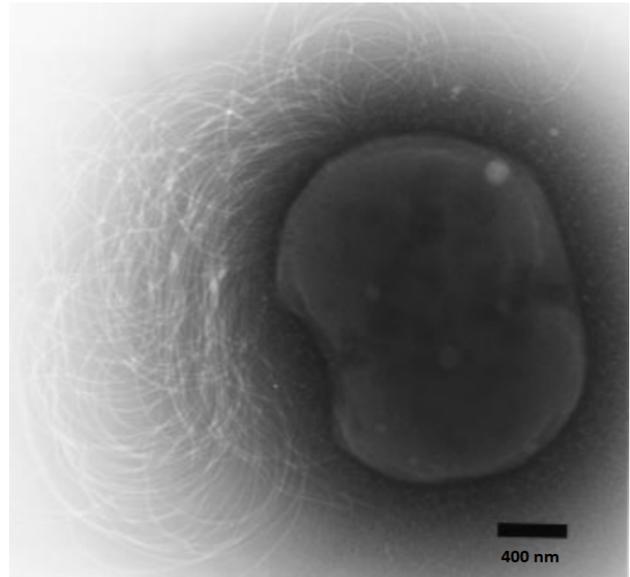


**Figura 4:** Fauna das fontes hidrotermais, com crustáceos e moluscos. NOAA Office of Ocean Exploration.

duzindo substâncias orgânicas. Tal ecossistema suporta uma rica fauna, incluindo seres multicelulares como crustáceos, polvos, moluscos e minhocas (Figura 4).

Uma exemplar de sobrevivência ao extremo é a arquea metanogênica, o único micro-organismo conhecido a produzir metano na ausência de oxigênio [18]. A Figura 5 mostra a fotografia eletrônica da espécie *Methanothermococcus okinawensis*, isolada de uma fonte hidrotermal do oceano profundo. Os experimentos envolvendo este ser são melhor detalhados na Seção 5.

A equação da metanogênese, envolvendo a produção de gás metano ( $\text{CH}_4$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) a partir de hidrogênio molecular ( $\text{H}_2$ ) e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), é a seguinte,



**Figura 5:** Micrografia eletrônica de células da arquea metanogênica *Methanothermococcus okinawensis*. Fonte: Ref. [19].

Vale citar ainda, que a bactéria *Deinococcus radiodurans* (Figura 6) tolera altos índices de radiação ultravioleta e baixas temperaturas, sendo um extremófilo bastante analisado.

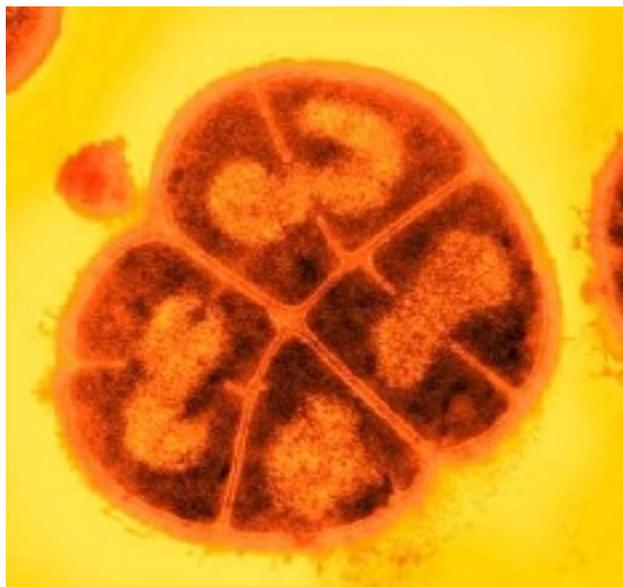
A análise de ambientes terrestres análogos às luas é de extrema importância já que, a partir deles, são criados modelos de habitabilidade das mesmas utilizando dados obtidos pelas sondas. Ainda, podem ser utilizados para desenvolvimento e teste de missões futuras para detectar vida.

### 3 Europa: a mítica lua de Júpiter

Os satélites galileanos, Io, Europa, Ganimedes e Calisto, originaram-se a partir do material remanescente da formação de Júpiter pela nuvem de gás e poeira ao redor do proto-Sol. São considerados um “mini Sistema Solar” visto que, assim como ocorreu a diferenciação química e estrutural entre planetas interiores rochosos e exteriores gasosos, os satélites mais próximos ao planeta principal são mais densos, compostos por materiais mais rochosos e metálicos.

Há ressonância nos períodos orbitais entre Ganimedes, Europa e Io de 1:2:4, produzindo efeitos de maré gravitacional sobre as luas, que se adicionam à influência de Júpiter [20].

Europa é, especificamente, a melhor candidata à habitabilidade entre os satélites galileanos, por



**Figura 6:** *Deinococcus radiodurans*, uma espécie de bactéria altamente resistente à radiação UV e a baixas temperaturas, como exemplo de organismo terrestre extremófilo. Créditos: [ESRF](#).

possuir uma combinação de atributos importantes: oceano interior, superfície com atividade geológica e estar em ressonância orbital, na qual é produzida energia que a aquece internamente.

O diâmetro da mesma, próximo a 3000 km (Tabela 1), pode ser associado à distância entre as cidades de São Paulo (SP) e Oiapoque (AP), cidade mais setentrional do Brasil, como mostra a Figura 7b.

Na mitologia grega, Europa foi uma mortal raptada pelo deus Zeus, correspondente a Júpiter na cultura romana, concedendo seu nome tanto para o continente como para o satélite [21]. Além disso, as linhas na superfície do satélite são nomeadas com referência aos contos da Odisseia, de Homero, como Rhadamanthys e Agenor, e demais acidentes são denotados em função de mitos, heróis e localidades celtas, tais como Pwyll e Conamara, a título de exemplo [22].

O núcleo rochoso é possivelmente rico em ferro (Fe), está em contato com um oceano de cerca de 100 km de profundidade abaixo de uma camada de gelo de espessura 3-30 km (recorte transversal na Figura 8). Supõe-se que o oceano e a crosta de gelo sejam compostos majoritariamente por  $H_2O$ , seguida de sulfato de magnésio ( $MgSO_4$ ) e sulfato de sódio ( $Na_2SO_4$ ). Também são importantes o cloreto de sódio ( $NaCl$ ),  $CO_2$  e íons de cálcio ( $Ca^{2+}$ ) e bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) [23, 24].

Como visto na Figura 7a, o satélite é atravessado

por fraturas longas e lineares, rachaduras e terrenos de caos, geradas por atividade tectônica e de estresse por marés. A coloração marrom-avermelhada vista em algumas regiões é possivelmente relacionada à deposição de substâncias com íons de enxofre (S) e magnésio (Mg) originadas nos grandes vulcões de Io. Novas análises indicam a existência de gás oxigênio ( $O_2$ ) formado por radiólise, a partir da interação de materiais na superfície com partículas energéticas da magnetosfera de Júpiter [25, 26].

Os vulcões terrestres expõem, por excesso de pressão interior, lava - rocha quente fundida. Ao invés disso, a atividade criovulcânica ejetava vapor, gases congelados e partículas de gelo. No caso de Europa e Enceladus, as “plumas” liberadas são como jatos de gêiser. Sua composição pode estar associada às fontes hidrotermais no fundo oceânico, que produzem ondas de convecção de calor.

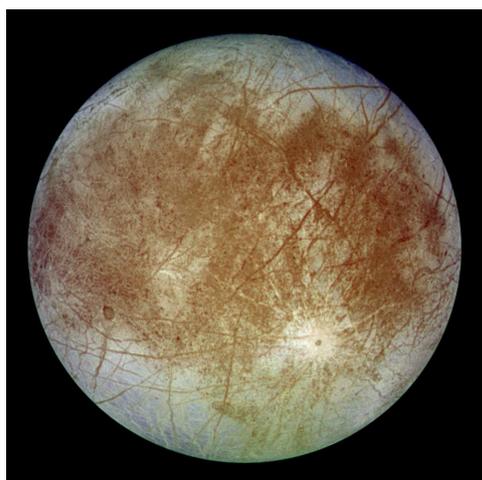
A existência da ejeção de material em Europa foi constatada com o telescópio espacial Hubble e por uma nova análise de imagens da Galileo. Em comparação às plumas de Enceladus, o fenômeno em Europa é de visualização mais difícil até para sondas espaciais, já que aparenta ser de menor intensidade e até esporádico, possivelmente devido à maior gravidade superficial da lua (Tabela 1).

O transporte de material interno até a superfície pode ocorrer então através de fissuras na crosta de gelo, encontradas por exemplo nos terrenos caóticos. Na Figura 9 mostra-se a região de Conamara, na qual houve movimentação de material por sucessivos derretimentos e congelamentos. Da mesma forma, estima-se que pode haver condução de substâncias da superfície, como  $O_2$ , para o interior de Europa [25]. Tais reservatórios de líquido podem ser pensados como candidatos para abrigar alguma forma de vida com a capacidade de permanecer em estado de latência entre períodos de derretimento do gelo [23].

A atividade geológica em andamento em Europa, resulta na formação de uma superfície jovem, formada há 1,5-30 milhões de anos, o que também é coerente com a pequena quantidade de grandes crateras de impacto, já que os terrenos estão em constante renovação [26].

#### 4 Titan: a grande lua de Saturno

Titan é a maior lua de Saturno e a segunda maior do Sistema Solar, após Ganimedes, sendo

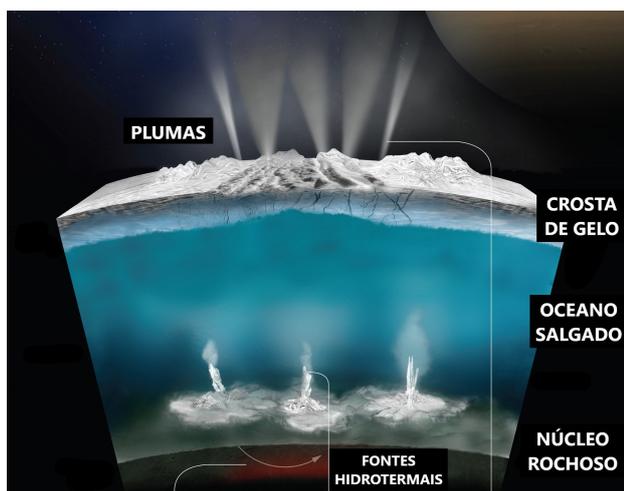


(a) Superfície de Europa. Créditos: NASA/JPL-Caltech/SETI.



(b) Distância entre as cidades de São Paulo e Oiapoque em comparação ao diâmetro de Europa. Créditos: Adaptado de Google Maps, 2022.

**Figura 7:** Superfície e escala de tamanho de Europa.



**Figura 8:** Ilustração do corte transversal para uma lua oceânica, como Europa e Enceladus. Créditos: Adaptada e traduzida de NASA/JPL-Caltech/Southwest Research Institute.



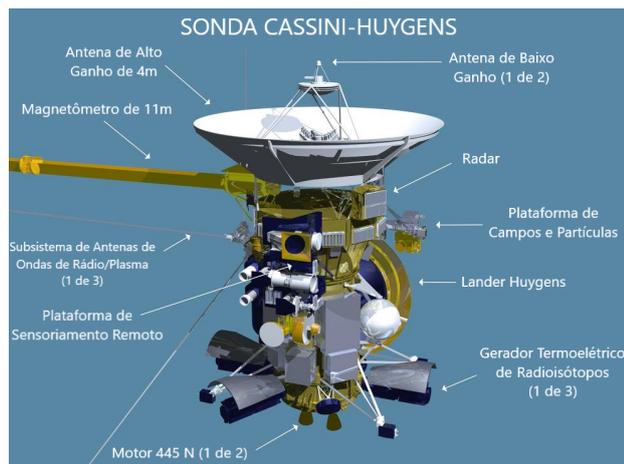
**Figura 9:** Região de caos de Conamara, hemisfério traseiro de Europa, com blocos de gelo que sofreram derretimento e posterior congelamento. Créditos: Science@NASA and NASA’s Goddard Space Flight Center.

maior do que o planeta Mercúrio e tendo o dobro do tamanho da Lua. Em uma escala de tamanho mais habitual, seu diâmetro de cerca de 5000 km (Tabela 1) corresponde à distância no globo entre as cidades de São Paulo e São Domingo (República Dominicana).

Seu nome vem da mitologia grega: os Titans eram os deuses supremos iniciais da mitologia grega, filhos do Céu (Uranos) e da Terra (Gaia). O mais importante foi Cronos (Saturno, em latim) e os nomes dos Titans foram dados aos principais satélites naturais de tal planeta. Ao maior deles foi dado simplesmente o nome de “Titan”.

Esta lua constitui um caso muito interessante para a astrobiologia, já que possui um oceano subterrâneo, uma atmosfera densa, muita matéria orgânica e lagos. Além disso, tem uma atividade geológica intensa, com ventos, erosão, chuva e depósito de sedimentos e, provavelmente, tectonismo e crio-vulcanismo [27]. Essas características foram certamente importantes para o surgimento e manutenção da vida na Terra. Como no caso de Europa e Enceladus, algum tipo de vida pode ter se desenvolvido no oceano interior de Titan.

A sonda Cassini-Huygens, vista na Figura 10, foi lançada em outubro de 1997, viajou por cerca de 7 anos e explorou o sistema de Saturno até 2017, quando mergulhou propositalmente na densa atmosfera do planeta. A Huygens se des-



**Figura 10:** Ilustração da sonda Cassini com o *lander* Huygens acoplado, e seus instrumentos científicos. Créditos: NASA Johnson Space Center, tradução dos autores.

tacou em dezembro de 2005 e foi lançada sobre Titan, para estudar sua atmosfera e seu solo. Permaneceu funcionando durante cerca de 70 minutos após a “atitanissagem” (até suas baterias acabarem), tendo detectado um solo rico em compostos orgânicos, como metano ( $\text{CH}_4$ ), etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), cianogênio ( $\text{C}_2\text{N}_2$ ), benzeno ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ), entre outros, típico de uma química complexa (Figura 11). Huygens foi o único instrumento construído pelo ser humano a pousar em um corpo nas profundezas do Sistema Solar.

Como a Terra e os vizinhos Vênus e Marte, Titan possui uma atmosfera que isola e protege confortavelmente sua superfície do hostil espaço exterior, favorecendo o aparecimento e a manutenção eventual de vida. Existem apenas dois corpos no Sistema Solar nos quais um ser humano pode sobreviver sem uma indumentária pressurizada e onde existem reservatórios perenes de líquidos: Terra e Titan. Contudo, os ares de Titan são muito diferentes dos nossos: são compostos quase que inteiramente de nitrogênio molecular ( $\text{N}_2$ , 95%, contra 78% na Terra) e de  $\text{CH}_4$  (5%, contra apenas 0,00017% na Terra), e a pressão atmosférica na superfície é de cerca de 1,5 vezes a terrestre. Além disso, a físico-química e a forte abundância de carbono - capaz de formar grandes moléculas - leva a reações químicas que produzem hidrocarbonetos como o  $\text{C}_2\text{H}_6$ . Tais moléculas orgânicas e seus derivados compõem a chuva em Titan, em que a temperatura média na superfície é de 94 K (cerca de  $-179^\circ\text{C}$ ). Na Terra, as nuvens de  $\text{H}_2\text{O}$  alimentam lagos e rios, e em Titan eles são formados essencialmente por  $\text{C}_2\text{H}_6$  e  $\text{CH}_4$

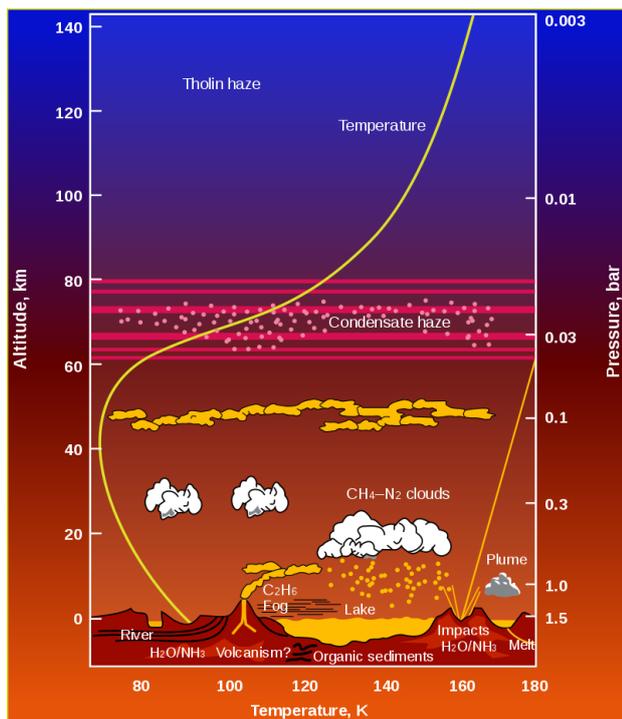


**Figura 11:** Imagem da Huygens da superfície de Titan. Créditos: ESA.

líquidos, que têm seus pontos de congelamento a 88 K e 84 K, respectivamente [28].

A atmosfera de Titan (Figura 12) é bombardeada na parte superior por fótons e pelo vento solar (elétrons e prótons), que, apesar da distância do Sol, causa efeitos significativos. Também atingida por partículas carregadas que são capturadas pela magnetosfera de Saturno. Como na Terra, existe nessa lua um efeito estufa, causado sobretudo por  $\text{CH}_4$ , aquecendo a superfície e a atmosfera, e fornecendo energia para que as reações químicas entre moléculas orgânicas complexas ocorram. São essas reações que explicam a densidade e o aspecto de névoa (“haze”) da atmosfera. A Figura 14b mostra a superfície no infravermelho, abaixo da nebulosidade.

A sonda Cassini levava uma dúzia de instrumentos das mais variadas especialidades, que analisaram os múltiplos aspectos de Titan através de 127 *flybys*. Foi graças a esses sobrevoos que foram descobertos na superfície vários acidentes, como rios e enormes lagos próximos ao polo norte da lua (comparáveis em tamanho aos chamados “Grandes Lagos” na fronteira entre os Estados Unidos e o Canadá), como por exemplo o Ligea Mare, na Figura 13. Ainda, há crateras, dunas, montanhas (e a presença de ventos e erosão), e possivelmente vulcões que parecem expelir lava gelada e grandes planícies escuras cobertas de gelo de água na re-

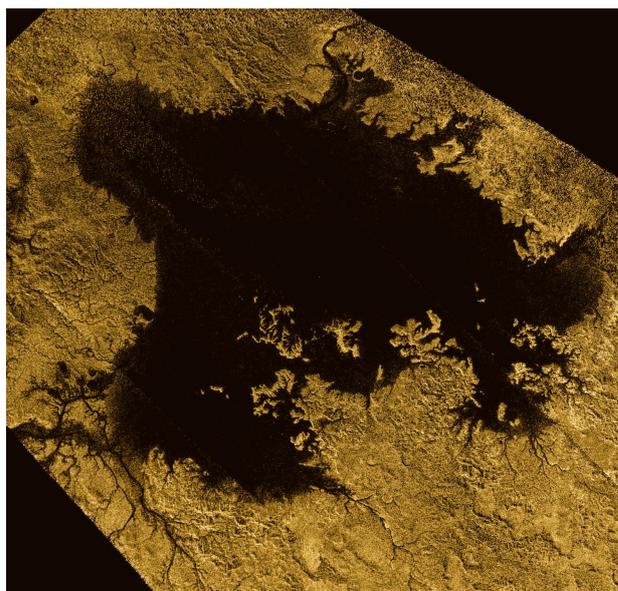


**Figura 12:** Gráfico detalhado de temperatura, pressão, altitude e compostos químicos relacionados à atmosfera de Titan. A névoa (*haze*) diminui a temperatura na baixa atmosfera, enquanto  $\text{CH}_4$  aumenta a temperatura na superfície. Há precipitação e formação de lagos de maneira similar ao ciclo hidrológico na Terra, mas com compostos orgânicos como  $\text{C}_2\text{H}_6$  e  $\text{CH}_4$ . Créditos: NASA/JPL-Caltech, via [Wikipedia](#).

gião equatorial, entre outros. Um oceano interior com profundidade entre 50 e 200 km também foi detectado via radar.

O radar da Cassini, entre outros instrumentos, permitiu que se fizesse um modelo da estrutura interna de Titan (Figura 14a). O interior contém água líquida porque, à semelhança do que ocorre em Europa e Enceladus, há aquecimento por forças de maré gravitacional, de modo que são alcançadas temperaturas bem superiores à da superfície.

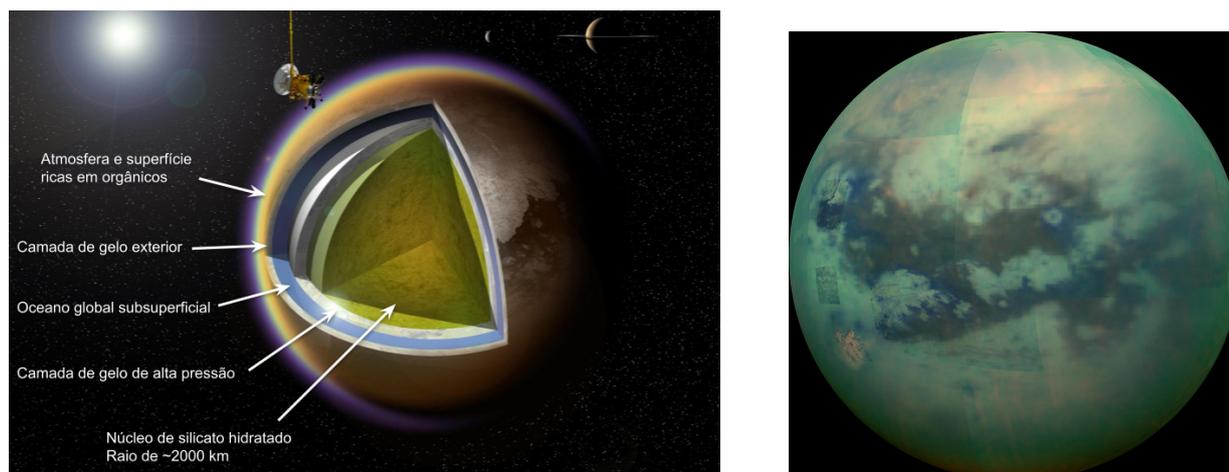
A atmosfera de Titan é semelhante à da Terra no período Arqueano (4-2,5 bilhões de anos atrás). Sua composição química, bem como a do solo, é dominada por  $\text{N}_2$ , o que faz com que moléculas orgânicas nitrogenadas sejam abundantes. Isso, aliado a uma temperatura da ordem de  $-180^\circ\text{C}$ , leva obviamente a que a química dominante na lua seja muito diferente da nossa, em que o solvente no qual as moléculas pré-bióticas podem reagir é a água e a presença do nitrogênio é bem mais baixa. Provavelmente, se a vida se desenvolveu em Titan, ela deve ter produzido re-



**Figura 13:** Ligeia Mare em cores falsas obtido pelo radar da Cassini. Créditos: [NASA/JPL-Caltech/ASI/Cornell](#).

sultados bastante diferentes do que conhecemos.

As células dos seres vivos primitivos, como bactérias e arqueas, e aliás, como qualquer célula de nosso corpo humano, necessitam de uma cavidade ou vesícula, que contenham seus componentes e os protejam do meio ambiente. Acredita-se que essas vesículas surgiram muito cedo na história da vida na Terra, provavelmente de forma concomitante. Em nosso planeta, os envoltórios ou membranas celulares (chamadas de fosfolipídios) são formadas de uma “cabeça”, contendo um átomo de fósforo ligado a vários de oxigênio, que tem polaridade elétrica negativa, e duas “caudas” formada por 15-20 átomos de carbono cercados de átomos de nitrogênio. As caudas são eletricamente neutras, enquanto a cabeça tem uma distribuição de cargas assimétricas, e é chamada de “polar” do ponto de vista elétrico. Quando essa estrutura é dissolvida em água, que é também uma molécula polar (os elétrons da água são mais fortemente atraídos para seu oxigênio do que para os átomos de hidrogênio). Isso faz com que o lado da molécula onde há hidrogênio seja ligeiramente mais positivo do que o de oxigênio. Essa característica polar da molécula da água faz com que ela atraia a cabeça polar do fosfolipídio que é, portanto, hidrófila (que gosta de água), e repele a cauda não-polar, que é hidrofóbica. Essas duas ações conjugadas fazem com que, quando fosfolipídios são dissolvidos em água, as propriedades elétricas das duas moléculas agindo juntas levam



(a) Modelo da estrutura interna de Titan, baseado em resultados obtidos sobretudo com o radar da Cassini. Ele contém um núcleo de rochas embebidas em água e camadas de gelo próximas à superfície. Entre essas camadas, existe um oceano de água líquida. Créditos: A. D. Fortes/UCL/STFC, tradução dos autores.

(b) Titan no infravermelho, sendo possível observar abaixo da camada de névoa de sua atmosfera. Créditos: NASA/JPL/University of Arizona/University of Idaho.

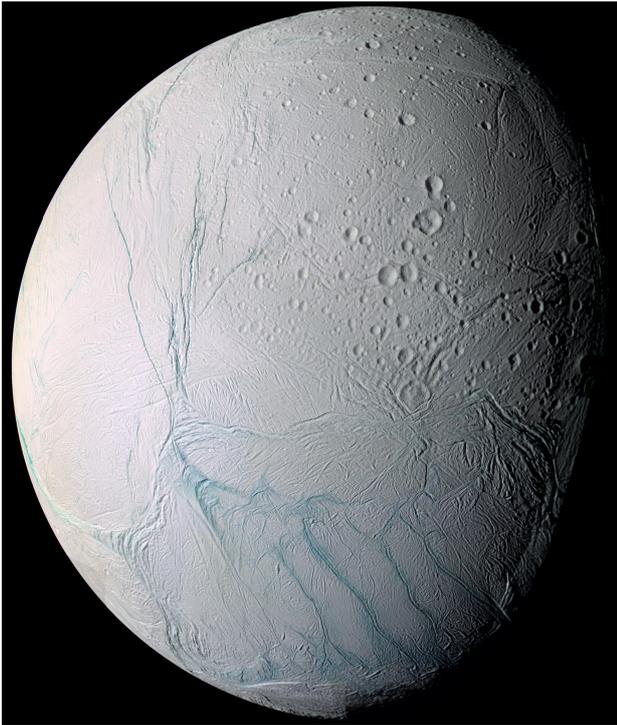
**Figura 14:** Esquema de seção transversal e fotografia de Titan.

os fosfolipídios a se organizarem na forma de uma membrana, suas cabeças de um lado e suas caudas do outro. Um conjunto de fosfolipídios tende a se agrupar, formando uma membrana. Na vida terrestre, o padrão encontrado é de cápsulas formadas por duas membranas de material lipídico.

E como seria em Titan, na ausência de água líquida e com pouquíssimo oxigênio? A partir das abundâncias químicas encontradas na atmosfera da lua, Stevenson et al. sugeriram que, em Titan, membranas tenham sido formadas por grupos de moléculas contendo um par CN, moléculas denominadas nitrilas ou cianetos, em substituição às membranas lipídicas terrestres [29]. A partir de análises teóricas e experimentos de laboratório envolvendo ambientes com forte concentração de nitrogênio dissolvidos em  $\text{CH}_4$  líquido e em temperaturas semelhantes às da superfície de Titan, no mesmo estudo foi mostrado que algumas nitrilas, como a acrilonitrila, são capazes de formar membranas e vesículas estáveis e com propriedades semelhantes às das terrestres. Uma das autoras é francesa, e eles deram à membrana ou vesícula o nome de “azotosome” (em francês, o nitrogênio é chamado de “azote”). A viabilidade de existirem membranas celulares em Titan abre a possibilidade da existência de vida por lá, mas bem distinta da que conhecemos na Terra.

Recentemente, outro grupo de pesquisadores, liderado por um brasileiro da Unicamp, fez um modelo da formação de uma grande cratera de

impacto (isto é, causada pela queda de um meteorito) em Titan chamada “Menrva”, que tem cerca de 430 km de diâmetro [27]. Seus resultados sugerem que a energia cinética do meteorito transferida para o solo causou um aumento de temperatura até cerca de 280 K ( $7^\circ\text{C}$ ), provocando o surgimento no local de um micro-ecossistema habitável durante horas. Além disso, a camada de gelo superficial se fundiu e água do oceano subterrâneo se misturou ao material aquecido da superfície. Essa água poderia já conter alguma forma primitiva de vida. De modo contrário a processos geológicos, como vulcanismo e tectônica de placas, o impacto de corpos celestes é ubíquo em todo o Universo, e independe das condições físicas e dinâmicas do sistema. Estes episódios possuem potencial de destruição de ambientes, representando uma barreira para emergência e manutenção da vida, mas também podem ocasionar ambientes propícios ao desenvolvimento de seres vivos, como lagos, fontes termais e locais onde há sedimentação de material [30]. Ainda, a colisão de objetos pode representar a entrada de componentes químicos importantes, em especial compostos orgânicos e voláteis. As crateras remanescentes de impacto são, então, novos locais potenciais onde a vida poderia se desenvolver nas luas do Sistema Solar.



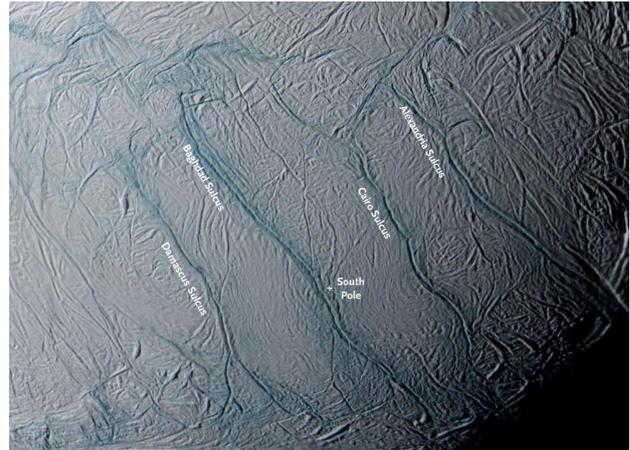
**Figura 15:** Superfície de Enceladus. Créditos: NASA/JPL/SSI.

### 5 Enceladus: a lua ativa de Saturno

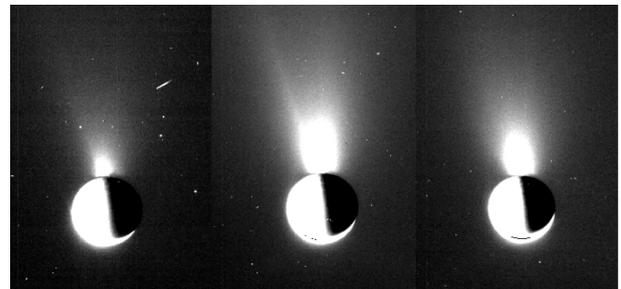
Enceladus (Figura 15) recebeu seu nome do gigante da mitologia grega, filho de Gaia e Uranus [5, 21]. Seu diâmetro de cerca de 500 km (Tabela 1) pode ser comparado à distância, em linha reta, entre as cidades de São Paulo (SP) e Belo Horizonte (MG).

Possui uma estrutura interna similar à de Europa (Figura 8), com um núcleo rochoso e poroso, um oceano global e uma camada de gelo. O criovulcanismo ocorre apenas no polo Sul, com plumas sendo liberadas de quatro fissuras nomeadas *tiger stripes* (listras de tigre). As mesmas foram nomeadas em referência a cidades mencionadas no conto popular do Oriente Médio “As Mil e Uma Noites”: Alexandria, Cairo, Bagdad e Damascus (Figura 16). Seu nome é seguido pelo termo *sulcus* (plural *sulci*), do latim.

Como resultado do travamento de maré com Saturno, Enceladus tem um período de rotação síncrono em relação ao planeta principal, mantendo sempre a mesma face voltada para este. Provavelmente a principal origem da atividade da lua vem da dissipação de energia por marés [31]. Além disso, a ressonância orbital de 2:1 com o satélite Dione [32] e o decaimento radiativo de componentes do núcleo também podem



**Figura 16:** *Tiger stripes* na superfície de Enceladus. São mostrados os *sulci* Alexandria, Cairo, Bagdad e Damascus, bem como o Polo Sul. Créditos: NASA/JPL/SSI/CICLOPS.



**Figura 17:** Variação das plumas de Enceladus em 2017: 18 de Junho, 02 de Agosto e 28 de Agosto, Observadas pela Cassini. Fonte: Ref. [34].

contribuir para o fenômeno [17, 33].

É possível notar ainda a relação direta entre a atividade das plumas, a posição de Enceladus em sua órbita e a variação da excentricidade orbital, consequência da interação de N-corpos. Como resultado, é observado um fenômeno de grande variabilidade na Figura 17, com intervalo de apenas alguns dias entre as fotografias.

Através dos *flybys* da Cassini, o espectrômetro de massa e o coletor de poeira cósmica identificaram que a composição das plumas é primariamente água - mais de 90% de  $H_2O$ . Além disso,  $CO_2$ , amônia ( $NH_3$ ),  $CH_4$ ,  $H_2$ , sulfato de hidrogênio ( $H_2S$ ), metanol ( $CH_3OH$ ), cianeto de hidrogênio ( $HCN$ ) e outros compostos orgânicos leves estão presentes. Também há sais, como  $NaCl$ , carbonato de sódio ( $Na_2CO_3$ ), bicarbonato de sódio ( $NaHCO_3$ ) e cloreto de potássio ( $KCl$ ) [17, 18]. O pH do oceano é estimado entre 11 e 12.

Partículas nanométricas de sílica ( $SiO_2$ ) foram capturadas na magnetosfera de Saturno, e sua ori-

gem mais provável é a atividade hidrotermal no fundo oceânico de Enceladus. Além disso, o fluxo expelido de grãos desse tamanho escapa da gravidade do satélite, é capturado pelos campos elétrico e magnético do planeta principal e fornece inclusive material para a constituição do anel E, o de maior distância ao planeta. Todavia, grãos de tamanho micrométrico caem na superfície do satélite, como neve [17, 35].

Para enfatizar a potência das plumas, foi demonstrado por observações da *Cassini* e do observatório espacial *Herschel*, operado pela ESA, que Enceladus é a origem principal da água presente na estratosfera de Saturno, de distribuição mais intensa no equador do mesmo [36].

De acordo com JPL-NASA, estima-se que a energia térmica total gerada no satélite seja de 15,8 gigawatts (GW) [37]. Em comparação, a potência gerada na Usina Hidrelétrica de Itaipu, entre o Brasil e o Paraguai, é de 14 GW, inferior à produção energética em Enceladus [38]. Já para Europa, estima-se que a taxa de aquecimento produzida no interior é cerca de 1.600 GW [22].

Em Taubner et al. foi analisada a produção de  $\text{CH}_4$  biológico em condições físico-químicas extrapoladas a Enceladus [18]. É indicado que a possível fonte mais relevante de  $\text{H}_2$  seja a serpentinização do mineral olivina no núcleo da lua. Resultados computacionais cinéticos e termodinâmicos indicam que deve haver produção suficiente deste composto para ser utilizada por microorganismos como substrato na metanogênese, detalhada na equação (1).

Os experimentos realizados em laboratório reproduziram um sistema de pH alcalino, com temperaturas de  $0^\circ\text{C}$  a  $> 90^\circ\text{C}$  e pressões de até 50 bar (5 MPa), constituído por cloreto de amônia ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), formaldeído ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) e metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ). Demonstrou-se que a arquea metanogênica *Methanothermococcus okinawensis* cresceu de maneira estável e reprodutível em diferentes misturas de gases e sem fases estendidas de latência e continuou realizando metanogênese. Taubner et al. também argumentam que é aceitável estimar que parte do  $\text{CH}_4$  detectado nas plumas de Enceladus seja produzido por atividades biológicas [18].

As condições físicas e químicas em certas regiões de Europa são semelhantes às da lua de Saturno, e pode-se portanto especular que arqueas extremófilas seriam também capazes de sobrevi-

ver na mesma.

## 6 Conclusões e perspectivas: futuras missões

Imensos progressos foram feitos nos conhecimentos do ser humano sobre as grandes luas dos gigantes gasosos do Sistema Solar, graças sobretudo às missões espaciais das últimas décadas. Aprendemos com elas que existe uma nova fronteira para a habitabilidade, pois os oceanos interiores, comuns nessas luas, ou superficiais (existentes em Titan) apresentam condições físico-químicas que permitem a extremófilos terrestres viverem nesses ambientes.

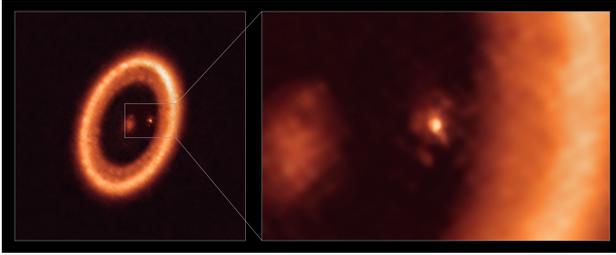
Para além de registrar as descobertas já feitas com as sondas espaciais, sobretudo a Galileo e a Cassini-Huygens, é relevante citar aqui as missões em fase de planejamento que auxiliarão a compreender melhor os “mundos oceânicos” num futuro próximo.

O projeto JUICE (Jupiter ICy moons Explorer), da agência espacial europeia ESA, tem lançamento planejado para 2023 e chegará ao sistema de Júpiter em 2029. Irá mapear emissões e interações dos vulcões de Io para Europa, bem como obterá detalhes sobre a possibilidade da existência de oceanos subsuperficiais também em Calisto e Ganimedes, terminando por se colocar em órbita ao redor do último em 2032, que é a única lua a possuir um campo magnético próprio.

Já a Europa Clipper, a ser lançada pela NASA em 2024, fará diversos *flybys* nos satélites galileanos. Em particular, um magnetômetro analisará como o oceano de Europa interage com o campo magnético de Júpiter e medirá sua profundidade e salinidade, um parâmetro importante para a análise da potencial habitabilidade da lua. Além disso, há um coletor de poeira para ser aplicado junto a um espectrômetro de massa, seguindo experiências do recolhimento de material das plumas de Enceladus pela Cassini [39].

Para o sistema de Saturno, está programada para 2027 a missão *Dragonfly*, composta de um helicóptero e *lander* enviado para a superfície de Titan, que inclui um equipamento para acompanhamento de sismos e condições meteorológicas.

Ainda pode ser citado o telescópio espacial *James Webb* (JWST), que foi lançado em 2021, poderá ser utilizado para imageamento e espectroscopia, sobretudo da atividade geológica de Eu-



**Figura 18:** À esquerda, sistema estelar PDS 70. À direita o planeta PDS 70c, do tipo Júpiter, no qual há um disco circumplanetário e a provável formação de exoluas. Fonte: Ref. [40].

ropa, além das contribuições já efetuadas pelo *Hubble*.

Em 2021, através do observatório ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) no Chile, detectou-se pela primeira vez a presença de um disco circumplanetário fora do Sistema Solar [40], visto na Figura 18. Tal fenômeno ocorre no sistema da estrela PDS 70, cerca de 400 anos-luz de distância da Terra, com dois planetas confirmados: PDS 70c e PDS 70b. O primeiro é um planeta do tipo Júpiter, de dimensões próximas ao gigante gasoso, com um disco de tamanho comparável à distância Sol-Terra e de massa suficiente para formar até três satélites do tamanho da Lua.

Além disso, em uma análise recente de observações de trânsito planetário com o telescópio espacial Kepler, foi aparentemente identificada uma exolua orbitando um planeta também do tamanho de Júpiter. Um estudo mais detalhado ainda é necessário para validar ou rejeitar a candidata Kepler-1708 b-i [41]. Trata-se de uma detecção difícil, mas espera-se que futuros satélites com novas técnicas possam melhorar esse cenário. Um exemplo próximo é o o PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars, da agência espacial europeia ESA, e do qual o Brasil participa, com astrofísica e engenharia. Será lançado em 2026, e suas modernas técnicas fotométricas permitirão, através de um tratamento de dados apropriado, melhorar bastante a possibilidade de detecção de luas de exoplanetas gasosos.

Em resumo, a abertura dessa nova perspectiva, da possibilidade de organismos diferentes de nós, *eucariotos* terrestres, poderem existir em luas de gigantes gasosos fora da Zona Habitável circunestelar, ocorre também em satélites de exoplanetas, ampliando assim, essa nova fronteira de habitabilidade através de toda a Via Láctea.

## Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo fomento nos editais de iniciação científica PIBIC 2020-2678 e 2021-2114, referentes aos projetos *Exoplanetas e Habitabilidade em Luas do Sistema Solar* e *Habitabilidade em Luas do Sistema Solar*, em ordem.

## Sobre os autores

Eduardo Janot Pacheco ([eduardo.janot@iag.usp.br](mailto:eduardo.janot@iag.usp.br)) possui doutorado em Astrophysique et Techniques Spatiales - Université de Paris VII (1987). Desenvolve pesquisa principalmente nos seguintes temas: estrelas Be, astrossismologia, astrofísica estelar, binárias de raios X, altas energias, astrobiologia e exoplanetas. Presidiu o Comitê CoRoT Brazil, que representa o país junto à missão espacial CoRoT, cuja finalidade foi a descoberta de exoplanetas e a astrossismologia (2002-2021) e foi membro do Scientific Committee do satélite CoRoT (agência espacial francesa CNES-França). Foi representante brasileiro no PLATO 2.0 Mission Consortium Board (2014-2021). Foi presidente da Sociedade Astronômica Brasileira e da Sociedade Brasileira de Astrobiologia. É professor Senior do IAG-USP e pesquisador ID do CNPq.

Vitória Bellecerie da Fonseca ([vitoriabfonseca@usp.br](mailto:vitoriabfonseca@usp.br)) é aluna de graduação do Bacharelado em Astronomia no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG-USP). Desde 2020 é bolsista CNPq - PIBIC de Iniciação Científica na área de astrobiologia e habitabilidade de luas do Sistema Solar, em especial Enceladus e Europa. É voluntária no Projeto Astrominas (IAG-USP).

## Referências

- [1] K. Olsson-Francis et al., *Editorial: Habitability beyond Earth*, *Front. Microbiol.* **9**, 2645 (2018).
- [2] J. F. Kasting, D. P. Whitmire e R. T. Reynolds, *Habitable zones around Main Sequence Stars*, *Icarus* **101**(1), 108 (1993).
- [3] R. Shapiro, *Origin of life: crucial issues*, in *Planets and Life: The Emerging Science of Astrobiology*, editado por W. T. Sullivan

- III e J. Baross (Cambridge University Press, 2007).
- [4] J. I. Lunine, *Ocean worlds exploration*, *Acta Astronaut.* **131**, 123 (2017).
- [5] D. R. Williams, *Solar System Small Worlds Fact Sheet*, NASA Space Science Data Coordinated Archive (2016). Disponível em [https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/galileanfact\\_table.html](https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/galileanfact_table.html), acesso em jun. 2022.
- [6] D. R. Williams, *Jovian Satellite Fact Sheet*, NASA Space Science Data Coordinated Archive (2018). Disponível em <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/joviansatfact.html>, acesso em jun. 2022.
- [7] D. R. Williams, *Saturnian Satellite Fact Sheet*, NASA Space Science Data Coordinated Archive (2019). Disponível em <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/saturniansatfact.html>, acesso em jun. 2022.
- [8] *Enceladus*, NASA Solar System Exploration. Disponível em <https://solarsystem.nasa.gov/moons/saturn-moons/enceladus/by-the-numbers/>, acesso em jun. 2022.
- [9] D. R. Williams, *Moon Fact Sheet*, NASA Space Science Data Coordinated Archive (2021). Disponível em <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/moonfact.html>, acesso em jun. 2022.
- [10] G. Mitri et al., *Exploration of Enceladus and Titan: investigating ocean worlds' evolution and habitability in the Saturn system*, *Exp. Astron.* (2021).
- [11] E. Garcia-Lopez e C. Cid, *Glaciers and ice sheets as analog environments of potentially habitable icy worlds*, *Front. Microbiol.* **8**, 1407 (2017).
- [12] L. Carré et al., *Relevance of earth-bound extremophiles in the search for extraterrestrial life*, *Astrobiology* **22**(3), 322 (2022).
- [13] I. von Hegner, *An ab initio definition of life pertaining to Astrobiology* (2019). Disponível em <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02272413>, acesso em ago. 2022.
- [14] R. Heller et al., *Formation, habitability, and detection of extrasolar moons*, *Astrobiology* **14**(9), 798 (2014).
- [15] M. Schulte et al., *Serpentinization and its implications for life on the early Earth and Mars*, *Astrobiology* **6**(2), 364 (2006).
- [16] P. Judge, *A novel strategy to seek biosignatures at Enceladus and Europa*, *Astrobiology* **17**(9), 852 (2017).
- [17] J. Kotlarz et al., *Microbial component detection in Enceladus snowing phenomenon*, *Astrophys. Bull.* **75**(2), 166 (2020).
- [18] R.-S. Taubner et al., *Biological methane production under putative Enceladus-like conditions*, *Nat. Commun.* **9**(1), 748 (2018).
- [19] K. Takai, *Methanothermococcus okinawensis sp. nov., a thermophilic, methane-producing archaeon isolated from a Western Pacific deep-sea hydrothermal vent system*, *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* **52**(4), 1089 (2002).
- [20] S. Ferraz-Mello, *Dynamics of galilean satellites. An introductory treatise* (Universidade de São Paulo, São Paulo, 1979).
- [21] Working Group for Planetary System Nomenclature (WGPSN), *Planet and Satellite Names, Discoverers and Themes*, Gazetteer of Planetary Nomenclature. Disponível em <https://planetarynames.wr.usgs.gov/Page/Planets>, acesso em jan. 2022.
- [22] R. Greenberg, *Unmasking Europa* (Springer, New York, NY, 2014), 2008 ed.
- [23] E. Lesage et al., *Constraints on effusive cryovolcanic eruptions on Europa using topography obtained from Galileo images*, *Icarus* **361**(114373), 114373 (2021).
- [24] M. Melwani Daswani et al., *A metamorphic origin for Europa's ocean*, *Geophys. Res. Lett.* **48**(18), e2021GL094143 (2021).

- [25] M. A. Hesse et al., *Downward oxidant transport through Europa's ice shell by density-driven brine percolation*, *Geophys. Res. Lett.* **49**(5) (2022).
- [26] A. P. Vid'machenko et al., *Asymmetry of reflective properties of the hemispheres of Jupiter satellite Europa*, *Astronomical School's Report* **7**(1), 133 (2011).
- [27] A. P. Crósta et al., *Exploring Habitability Conditions in Titan's Impact Record: The Formation of Menrva Crater*, in *52nd Lunar and Planetary Science Conference* (2021), Lunar and Planetary Science Conference, 2309. Disponível em <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/2309.pdf>, acesso em ago. 2022.
- [28] *Titan*, NASA Solar System Exploration. Disponível em <https://solarsystem.nasa.gov/missions/cassini/science/titan/>, acesso em jun. 2022.
- [29] J. Stevenson, J. Lunine e P. Clancy, *Membrane alternatives in worlds without oxygen: Creation of an azotosome*, *Sci. Adv.* **1**(1), e1400067 (2015).
- [30] G. R. Osinski et al., *The role of meteorite impacts in the origin of life*, *Astrobiology* **20**(9), 1121 (2020).
- [31] A. M. Schoenfeld, A. Yin e E. Leonard, *A dust-devil-like vortex in Enceladus' ocean: a model for rapid transport of hydrothermal products from ocean floor to erupting ice-shell fractures*, in *51st Lunar and Planetary Science Conference* (2020). Disponível em <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2020/pdf/2821.pdf>, acesso em ago. 2022.
- [32] K. Zhang e F. Nimmo, *Internal structure of Enceladus and Dione from Orbital Constraints*, in *40th Lunar and Planetary Science Conference* (2009). Disponível em <https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2009/pdf/2199.pdf>, acesso em ago. 2022.
- [33] C. J. Hansen, L. W. Esposito e A. R. Hendrix, *Ultraviolet observation of Enceladus' plume in transit across Saturn, compared to Europa*, *Icarus* **330**, 256 (2019).
- [34] A. P. Ingersoll, S. P. Ewald e S. K. Trumbo, *Time variability of the Enceladus plumes: Orbital periods, decadal periods, and aperiodic change*, *Icarus* **344**(113345), 113345 (2020).
- [35] B. D. Teolis et al., *Enceladus plume structure and time variability: Comparison of cassini observations*, *Astrobiology* **17**(9), 926 (2017).
- [36] T. Cavalié et al., *Herschel map of saturn's stratospheric water, delivered by the plumes of enceladus*, *Astron. Astrophys.* **630**, A87 (2019).
- [37] *Enceladus the Powerhouse* (2011). Disponível em <https://www.jpl.nasa.gov/images/enceladus-the-powerhouse>, acesso em jun. 2022.
- [38] *Perguntas frequentes*, Itaipu Binacional. Disponível em <https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/perguntas-frequentes>, acesso em mar. 2021.
- [39] L. F. Coelho e Z. Martins, *The Geochemistry of Icy Moons*, in *Encyclopedia of Geology*, 2 ed., editado por D. Alderton e S. A. Elias (Academic Press, Oxford, 2021), 207.
- [40] M. Benisty et al., *A circumplanetary disk around PDS70c*, *Astrophys. J. Lett.* **916**(1), L2 (2021).
- [41] D. Kipping et al., *An exomoon survey of 70 cool giant exoplanets and the new candidate Kepler-1708 b-i*, *Nat. Astron.* **6**(3), 367 (2022).