

# Os limites para a vida na biosfera terrestre

Jorge E. Horvath

Universidade de São Paulo

## Resumo

Apresentamos neste artigo um panorama dos limites físicos que os organismos vivos podem suportar para se desenvolver, em termos de temperatura, pressão, acidez e outros parâmetros importantes. Discutimos também a recente avaliação quantitativa das biomassas de cada grupo e a questão dos organismos quimioautotróficos.

## Abstract

We present in this article a broad overview of the physical limits in which living organisms can bear to develop in terms of temperature, pressure acidity and other important parameters. We also discuss the recent quantitative evaluation of biomasses of each living group and the issue of chemoautotrophic organisms.

**Palavras-chave:** biosfera terrestre, astrobiologia, origem da vida.

**Keywords:** terrestrial biosphere, astrobiology, origin of life.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38512](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38512)

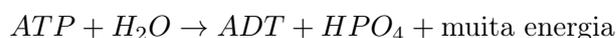
## 1 Introdução

Pela nossa condição de mamíferos macroscópicos é inevitável que a maior parte de nós tenha uma visão antropocêntrica da vida no planeta Terra. Pensamos em termos de animais e plantas que conhecemos como “os seres vivos” na maior parte do tempo, embora saibamos muito bem que existem micro-organismos em quantidade na biosfera, muitos deles fundamentais para nossa própria existência. Mais ainda, este último grupo pertence principalmente ao reino dos *procariontes*, embora existem *eucariontes* unicelulares que não são plantas, fungí nem animais. Esta classificação moderna de “seis Reinos” (Fig. 1) é uma evolução natural da antiga visão, e agora fortalecida pelo conhecimento fornecido pela Biologia Molecular de enorme desenvolvimento nas últimas décadas.

Levando em conta que boa parte dos seres vivos é microscópica, cabe assim perguntarmos pela *distribuição* da biomassa, ou massa dos seres vivos, e se ela é diferente em diferentes ambientes da biosfera. E também por uma questão intimamente relacionada: que tipo de metabolismo(s)/fontes de energia alimentam estas criaturas? Até há pouco tempo tínhamos por verdadeiro que a fotossíntese era o mecanismo fundamental e básico das chamadas *cadeias trópicas*, no sentido que os produtores primários eram todos

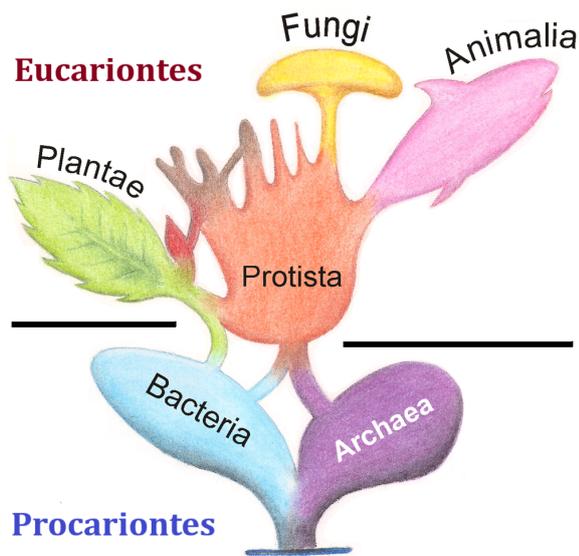
organismos fotossintéticos. Porém, a descoberta bastante recente de seres *quimioautotróficos* que se alimentam de reações químicas, e não precisam em absoluto da luz solar, foi confirmada e modificou bastante essa percepção.

Se há um fato “unificador” das formas de vida dos seis Reinos, certamente é a utilização universal por todos os organismos conhecidos da molécula de *ATP* (trifosfato de adenina) para estocar energia e entregá-la quando alguma enzima a necessite para metabolizar o alimento. Quando a energia não é requerida, o *ATP* se recombina, já que atua como uma *bateria química* que reside nas mitocôndrias. O tipo de reação que libera energia para o metabolismo funcionar é



onde o *ADT* é o difosfato de adenina. Agora bem, tanto os organismos fotossintéticos quanto os quimiossintéticos precisam sintetizar *ATP* como parte essencial do funcionamento do seu metabolismo, seja qual for.

Notavelmente, estes organismos quimioautotróficos são também fortes candidatos a serem a primeira forma de vida na Terra, se esta se desenvolveu independentemente no nosso planeta. Adquire assim significação especial a questão geral dos extremófilos, ou seja, da adaptação da vida a ambientes extremos (os quimioautótrofos são



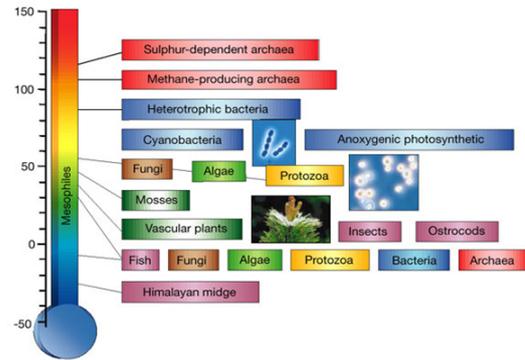
**Figura 1:** Os “Seis Reinos” separados pela divisão fundamental entre células com núcleo (eucariontes) e sem núcleo (procariontes). A classificação tem alguns problemas evidentes, por exemplo, um protista é qualquer eucarionte que não seja um fungo, animal ou planta, mas as relações com estes últimos (representada pelos elos na figura) podem ser mais fundamentais que entre outros protistas entre si, já que não parecem ser um grupo “natural”. Para muitos biólogos qualquer unicelular eucarionte é, de fato, um protista. Adaptada da Ref. [1].

quase todos extremófilos). Todas estas questões serão objeto deste artigo geral.

## 2 A vida nos extremos

Devido às nossas próprias condições de vida, temos uma tendência a pensar que ambientes muito frios ou quentes, muito ácidos ou alcalinos ou com altas doses de radiação ultravioleta ou radioatividade são inóspitos e inabitáveis. Porém, esta perspectiva é muito limitada e em geral, errônea: na verdade, os organismos que habitam ambientes extremos (os *extremófilos*) estão adaptados a eles de tal forma que se encontram perfeitamente confortáveis, e nem sobreviveriam em condições mais “amenas”. Há inúmeros exemplos, tanto em bactérias e fungos quanto até em mamíferos do tipo o urso polar, que se desenvolvem muito bem com temperaturas de  $-20^{\circ}\text{C}$  ou  $-30^{\circ}\text{C}$ . Usando uma frase do Prof. D. Gili-chinsky da Academia de Ciências Russa: “os ambientes nunca são extremos para seus habitantes, somos nós os frouxos...”.

Diversos ambientes do planeta têm sido coloni-

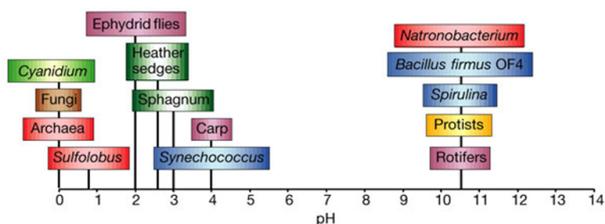


**Figura 2:** Organismos extremófilos nos extremos da temperatura dos ambientes. A mosca do Himalaia é o recorde negativo, embora existam várias algas, fungos, bactérias, archeas e até peixes que vivem sem problema em temperaturas moderadamente negativas. No outro extremo encontramos as archeas que metabolizam sulfatos e metano, vivendo em ambientes de até uns  $120^{\circ}\text{C}$ . Há registros de unicelulares que vivem em ambientes de quase  $200^{\circ}\text{C}$ .

zados pela vida que extrai energia principalmente da fotossíntese, mas se esta não for possível pela ausência de luz suficiente, descobrimos que a vida recorre a se alimentar por meio de *reações químicas*, que podem ser iniciadas pela radioatividade. O estudo e classificação destes organismos extremófilos resultou na determinação de *limites físicos* dos ambientes (embora é possível que, no futuro, possam ser descobertos casos que superem estes limites). As formas de vida que vivem em ambientes extremos em mais de um parâmetro podem ser denominadas *multiextremófilas*.

Começamos pela resistência à temperatura. A Fig. 2 mostra os organismos recorde no extremo frio e quente da temperatura média do ambiente. Os organismos mais resistentes, que podem viver com calor extremo de  $\sim 120^{\circ}\text{C}$ , são archeas que metabolizam sulfatos e produzem metano, ou que se alimentam do próprio metano. No entanto, no extremo oposto uma pequena mosca dos Himalaias resiste  $-30^{\circ}\text{C}$  ou mais sem ser afetada. Uma variedade de peixes, fungos, bactérias, algas e protozoários vivem sem problemas em temperaturas de  $-10^{\circ}\text{C}$  e outros (a exemplo do urso polar já mencionado) podem resistir temperaturas ainda menores, mas por tempo limitado. Vemos que nossa “temperatura de conforto” humana, algo entre  $0^{\circ}\text{C}$  e  $25^{\circ}\text{C}$ , é muito quente para estes últimos e muito fria para as archeas hipertermófilas que vivem em gêiseres e ambientes de alta temperatura.

Outra condição importante para a vida é o *pH*



**Figura 3:** Organismos extremófilos no que diz a alcalinidade ou acidez do meio no qual vivem. A vida se desenvolve com sucesso tanto em meios muito ácidos (esquerda) ou muito alcalinos ou básicos (direita).

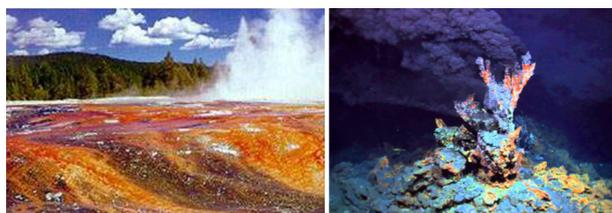
do meio. O  $pH$  é uma medida desenvolvida pelos químicos para medir a acidez ou alcalinidade. O valor  $pH = 7$  é o ponto zero, onde o meio não é nem alcalino nem ácido. Valores maiores que 7 indicam um meio alcalino (também chamado de básico), e inferiores a 7 um meio ácido. Na Fig. 3 são mostrados os organismos que ocupam esta faixa de  $pH$ , de 0 até 10 aproximadamente. Ao que parece, nenhuma membrana celular existente resiste uma alcalinidade maior, mas no extremo oposto da acidez há mecanismos que permitem às células prosperarem.

Nas maiores pressões possíveis no planeta, no fundo dos oceanos, é possível achar micro-organismos, mas também vários peixes e formas de vida macroscópicas, que suportam pressões de até 500 atm. Para efeitos de comparação, esmagar uma lata de cerveja com as mãos requer somente umas 20 atmosferas. Nenhum submarino militar vai muito além dos 1000 m de profundidade. Os batiscafos de pesquisa têm ido além dos 10.000 m na Fossa das Marianas, mas com desenho e construção cuidadosamente executados, suportando umas 1000 atm.

A resistência à radiação UV é também outra característica que permite os organismos viverem em ambientes de elevada exposição solar e baixa coluna de ar, por exemplo, nos desertos em altitudes acima de 3000 m. Um dos “campeões” destes ambientes é a bactéria *Deinococcus Radiodurans* (Fig. 4), que pode viver em ambientes onde a dose de UV mata rapidamente qualquer mamífero. O segredo deste e outros poucos unicelulares similares parece ser uma combinação da genética (já que têm um gene que repara rapidamente os danos ao DNA produzido pelos fótons ultravioletas), e estrutura, já que conta com uma espécie de blindagem das partes fundamentais, proteínas únicas e numerosas sequências



**Figura 4:** Esquerda: como exemplo de organismo viável em pressões extremas, o peixe dente-de-presas da imagem é achado nas profundezas oceânicas abaixo de 4.000 m, onde as pressões são de até 500 atmosferas. Direita: a bactéria *Deinococcus Radiodurans*, paradigma de resistência à radiação UV fotografada com microscópio.



**Figura 5:** Esquerda: um ambiente quente e ácido na superfície terrestre, no qual várias espécies de hipertermófilos vivem e prosperam. Direita: uma fonte hidrotermal submarina, ambientes candidatos a ter abrigado os primeiros organismos vivos da Terra. Nesta hipótese, os hipertermófilos surgiram aqui e foram se adaptando a ambientes menos extremos devido à evolução Darwiniana.

de nucleotídeos duplicadas. Há alguns anos uma equipe brasileira identificou cepas no deserto de Atacama [2] (principalmente *Cryptococcus friedmannii*, *Exophiala sp.*, *Holtermanniella waticus* e *Rhodospiridium toruloides*) que resistiram doses muito altas de radiação, e assim ganharam o apelido de “bactérias marcianas”, já que poderiam viver tranquilamente na superfície de Marte com uma atmosfera muito tênue, similar à da altitude de Atacama. Outros exemplos de ambientes extremos onde os organismos se desenvolvem sem problemas se mostram na Fig. 5.

Para finalizar este tópico, podemos nos referir às descobertas recentes de micro-organismos achados em minas na África do Sul a mais de 3.000 m de profundidade, onde não há absolutamente nenhuma luz solar que as alimente. Na Fig. 6 (direita) vemos um minerador sul-africano ao lado de uma colônia de organismos deste tipo. Como comprovou-se que a fonte de energia que viabiliza esta forma de vida é a redução de sulfatos fornecidos pela *radiólise* da água, e este último processo se deve ao decaimento radioativo dos elementos nas rochas, em última instância essas bactérias “comem radioatividade”, já que sem esta



**Figura 6:** Esquerda: um esquema do lago subglacial Vostok na Antártida. Direita: a mancha branca constitui uma colônia de bactérias que reduzem sulfatos liberados pelo decaimento radioativo dos elementos das rochas.

não poderiam se alimentar. Este tipo de descoberta, de organismos quimioautotróficos, levou a pensar que do subsolo até as profundezas, a biosfera poderia abrigar uma biomassa comparável à da que tem a fotossíntese como processo exclusivo de fonte de energia (vide seção 3). O ecossistema isolado do lago Vostok (Antártida) é outra descoberta complementar de grande interesse, já que resulta um análogo das luas geladas de Júpiter e possivelmente dos lagos subterrâneos de Marte. A mais de 5.000 m de profundidade abaixo do gelo antártico achou-se um ecossistema inteiro com espécies desconhecidas [3], isoladas do resto da biosfera há muitos milênios, pelo menos desde a última glaciação, embora houve quem defendesse um tempo muito mais longo. O fato é que, a pesar da controvérsia a respeito da contaminação das brocas que furaram o gelo, foram achadas abundantes formas de vida extremas (por exemplo, os criptoendolitos como o *Bacillus infernus*, cujo nome é mais que sugestivo) e micro-organismos não identificados, o qual reforça a ideia da componente subterrânea extrema do planeta.

Uma extensão interessante, ainda que especulativa, é que a radiólise poderia acontecer em ambientes extraterrestres com iluminação inexistente(ou quase) da estrela central. Por exemplo, Altair, de Avellar, Rodrigues e Galante [4] mostraram que seria razoável esperar que este tipo de vida existisse nos satélites jovianos Europa e Encélado, se as condições fossem as mesmas que as dos organismos conhecidos na Terra. Este tipo de proposta não deixa de depender da presença de água líquida, mas dispensa por completo uma fonte de energia que permita a fotossíntese.

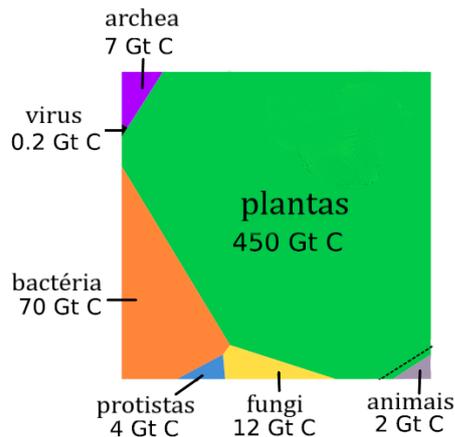
### 3 Avaliações da biomassa

Muitas vezes foi escrito que a Terra era “O Planeta dos Unicelulares”, no sentido que a maior parte da biomassa era suspeita de ser constituída por organismos deste tipo. Certamente não conhecemos mais que uns 10% ou menos do total das espécies procariontes (isto se repete com os insetos e outras classes), mas o número de espécies não tem por quê automaticamente levar à deter a maior parte da biomassa. Assim, esta questão precisou ser aprofundada.

Outra questão que emergiu com a descoberta dos quimioautotróficos é a da *fração* da biomassa que eles representam. Houve sugestões de que os quimioautotróficos seriam tão abundantes em massa quanto os fotoautotróficos (plantas, cianobactérias e outros), mas que permaneceriam “escondidos” no subsolo ou em profundidades maiores.

Estas controvérsias têm sido agora abordadas quantitativamente por Bar, Phillips e Milo [5]. O trabalho mostrou de forma convincente que: a) a biomassa é muito dependente do ecossistema considerado, o qual era esperado; e b) que a maior biomassa total da Terra está nas plantas, que superam por muito a soma dos procariontes e os protistas. Estes resultados se mostram no diagrama da Fig. 7. Portanto, somente haveria uma reviravolta se os micro-organismos no subsolo profundo somassem uma biomassa de mais de 350 bilhões de toneladas de carbono, o qual parece improvável. De passagem, a questão da componente da biosfera que recorre à síntese química fica mais esclarecida: sua biomassa é importante, mas ainda que fossem o total das espécies desconhecidas, não devem dominar o balanço total.

Em conclusão, os extremófilos indicam caminhos evolutivos de grande interesse, já que não tão somente podem ter sido os primeiros organismos da vida na Terra, mas também poderiam ser indicativos do que podemos nos encontrar em ambientes extraterrestres, tais como Marte ou as luas de Júpiter. Existem evidências de depósitos devidos a fontes hidrotermais como as da Fig. 5 com idades de quase 3,5 Giga anos [6]. A presença de água na superfície marciana primitiva é também firme, e faz pensar que os extremófilos hipertermófilos podem ter sido comuns à Terra e Marte, embora as bioassinaturas não sejam ainda completamente identificadas e dificultem a busca.



**Figura 7:** A biomassa da Terra (marinha + terrestre) em bilhões de toneladas de Carbono (Gt C). Adaptada da Ref. [5]. Segundo estes resultados apresentados em figuras com área proporcional a sua ocorrência percentual, as plantas são a maior biomassa da Terra.

A procura por bioassinaturas in situ destes organismos já começou em Marte e também há planos ambiciosos para fazê-lo em Encelado e outros corpos [7, 8]. No entanto, o nosso desconhecimento dos extremófilos terrestres é ainda enorme, tal como ilustrado pelo caso do lago Vostok. Antes de concluir apressada e especulativamente pela afirmativa ou negativa no caso daqueles, precisamos estudar a fundo os ambientes extremos na nossa própria Terra. De fato, esta é a forma mais eficiente e econômica de compreender a biologia, ecologia e evolução das criaturas mais extremas das quais temos conhecimento [7, 8].

### Sobre o autor

Jorge Ernesto Horvath ([foton@iag.usp.br](mailto:foton@iag.usp.br)), Professor Titular no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Espaciais (IAG), da Universidade de São Paulo (USP), é Graduado em Física e Doutor em Ciências Exatas pela Universidad Nacional de La Plata (Argentina), e possui Livre Docência pela USP. Autor de pesquisas em Astrofísica Relativística, Altas Energias e Cosmologia, além de vários livros no Brasil e no exterior para os diferentes níveis de educação. Pesquisador Nível I do CNPq e visitante na University of Arizona (1998-1999). Fundador e Coeditor da

Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia (RELEA) desde 2003. Coordenou de 2011 até 2021 o Núcleo de Pesquisas em Astrobiologia da USP.

### Referências

- [1] R. Seamon, *Genetic 1: classification of life*, Slideshare (2018). Disponível em <https://pt.slideshare.net/seamonr/genetics1-classification-new-85764406>, acesso em maio de 2022.
- [2] A. A. Pulschen et al., *UV-resistant yeasts isolated from a high-altitude volcanic area on the Atacama Desert as eukaryotic models for astrobiology*, *MicrobiologyOpen* **4**(4), 574 (2015).
- [3] F. Diep, *Thousands of species found In Lake Vostok ice*, *Popular Science* (2013). Disponível em <https://www.popsci.com/science/article/2013-07/thousands-species-found-lake-vostok-ice/>, acesso em jun. 2022.
- [4] F. R. T. Altair, M.G.B. de Avellar e D. Galante, *Microbial habitability of Europa sustained by radioactive sources*, *Scientific Reports* **8**, 260 (2018).
- [5] R. P. Y.M. Bar-On e R. Milo, *The biomass distribution on Earth*, *Scientific Reports* **15**(25), 6506 (2018).
- [6] J. R. Havig et al., *Hot spring microbial community elemental composition: Hot spring and soil inputs, and the transition from biocumulus to siliceous sinter*, *Astrobiology* **21**(12), 1526 (2021).
- [7] D. Galante et al. (eds.), *Astrobiologia: Uma ciência emergente* (Tikinet Edição e IAG/USP, São Paulo, 2016). Disponível em <https://www.iag.usp.br/astrobiologia/sites/default/files/astrobiologia.pdf>, acesso em jul. 2022.
- [8] J. A. de Freitas Pacheco, *Vida no Universo* (EDUSP, São Paulo, 2020).