

Aula 16 - Extremófilos (tipos, propriedades, zona de habitabilidade extrema).

1. Introdução

Nas últimos tempos os cientistas têm se interessado pela busca dos organismos que sobrevivem aos ambientes mais hostis ou letais para a maioria dos seres vivos. A maioria dos seres vivos necessita de condições parecidas para sobreviverem, apesar das diferenças específicas de cada tipo de habitat. No entanto, alguns organismos têm como principal características a capacidade de se proliferarem em ambientes com condições que seriam consideradas extremas e até fatais para a maioria dos outros seres vivos. O fato de viverem em ambientes inóspitos para todos os outros seres e em geram de maneira extrema deu origem ao termo extremófilos.

Uma vez que eles vivem em "ambientes extremos" (sob alta pressão e temperatura), eles podem nos dizer em que intervalo as condições de vida são possíveis. É importante notar que estes organismos são "extremos" apenas a partir de uma perspectiva humana. Enquanto oxigênio, por exemplo, é uma necessidade para a vida como conhecemos, contudo, alguns organismos prosperam em ambientes sem oxigênio.

A razão do estudo de extremófilos na Terra é uma forma de entender melhor a grande variedade de condições sob as quais a vida pode evoluir e sobreviver, assim como nos ajudar a compreender alguns dos mecanismos que os organismos podem empregar para sobreviver em diferentes condições ambientais extremas¹². A possibilidade de desenvolvimento de vida em ambientes extremos aumenta exponencialmente a capacidade de habitabilidade do universo, o que é de grande interesse no campo da astrobiologia.

Sendo assim, quando olhamos para um ambiente extremo em algum outro planeta ou lua, teremos uma ideia muito melhor de como os organismos, tais como os extremófilos, poderiam sobreviver nesses ambientes. Nesta aula estudaremos os extremófilos, seus tipos, propriedades e zona de habitabilidade extrema.

2. Extremófilos

O termo extremófilo foi utilizado pela primeira vez em 1974 por MacElroy quando o mesmo se referia a ambientes extremos, ambientes esses que foram definidos como ambientes que apresentam diversidade biológica restrita, isto é, tem condições que exclui a maior parte dos organismos.

Sob o ângulo antropocêntrico, ambientes "amenos" são aqueles com temperaturas próximas da ambiente até 40°C, valores de pH próximo da neutralidade, salinidade relativa a dos oceanos, pressão atmosférica e radiação semelhantes à superfície terrestre em condições normais. Enquanto, regiões polares, fontes ácidas ou alcalinas, lagos com níveis de salinidade próximos ou acima de saturação, regiões abissais frias ou zonas bombardeadas com altos níveis de radiação são ambientes terrestres imediatamente reconhecidos como ambientes extremos.

Em diversos lugares na terra podemos encontrar ambientes extremófilos tais como zonas vulcânicas terrestres e sistemas hidrotermais submarinos. Na Figura a seguir vemos o Parque Nacional de Yellowstone nos Estados Unidos, um exemplo de ambiente, onde as temperaturas podem ser maiores que 80 °C.



Figura 1. Yellowstone National Park, EUA¹¹, um exemplo de ambiente extremófilo.

Outro exemplo inclui regiões extremamente ácidas, como o Rio Tinto, localizado na Espanha, onde o nível de pH gira em torno de 1.5 a 3, com alta concentração de sulfatos Fe^{3+} , Metais pesado (Zn^{2+} , Cu^{2+}), etc. Diversas espécies já foram detectadas nesse rio como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum sp*, *Thermoplasma acidophilum*



Figura 2. Rio Tinto, na Espanha. Em suas águas residem uma grande variedade de extremófilos. Foto: Monike Oggerin.

O Great Salt Lake localizado na parte norte dos Estados Unidos, em Utah, é o maior lago de água salgada no Hemisfério Ocidental. tem muito alta salinidade , muito mais salgado que a água do mar , e seu conteúdo mineral está aumentando constantemente²⁴. Possui concentração salina próxima a saturação (5.3 M NaCl) similar composição salina da água do mar.

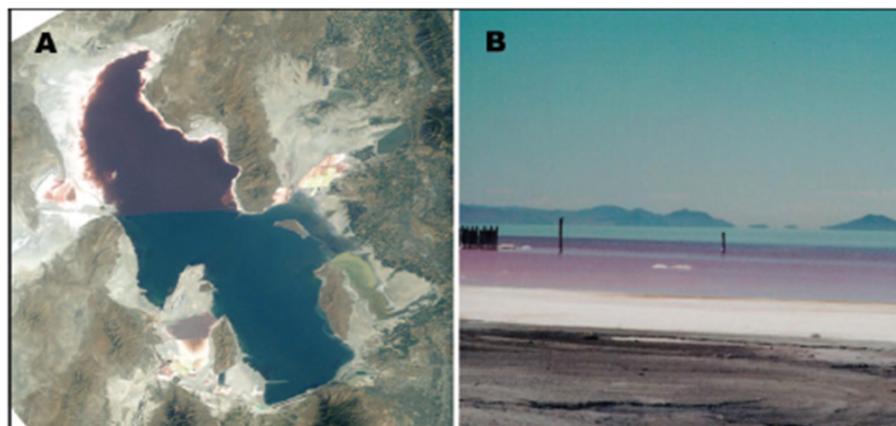


Figura 3. Great Salt Lake, Utah (USA).

Já o Lago Vostok, um reservatório de água subterrânea da Antártida isolado do mundo exterior a mais de 15 milhões de anos, revela um complexo ecossistema onde foram detectadas milhares de formas de vida microscópicas, predominantemente bactérias²⁶.

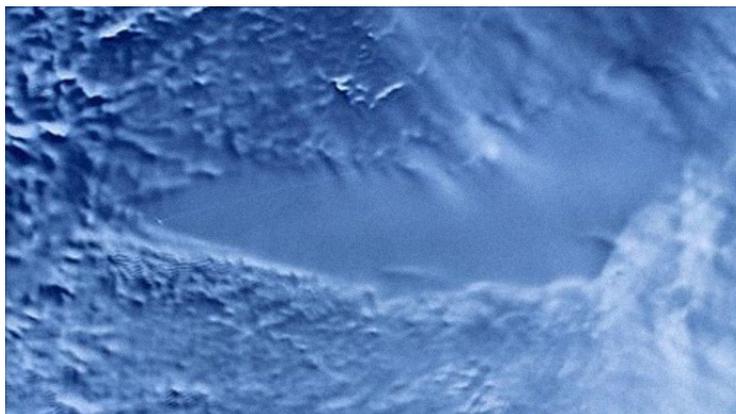


Figura 4. Imagem RADAR SAT do Lago Vostok, na Antártida. (NASA).

Água no lago Vostok está localizado 4.000 metros abaixo do gelo que bloqueia completamente a luz solar e cria uma enorme pressão sobre o líquido. Também está literalmente localizado no lugar mais frio da Terra: temperatura mais baixa do mundo de -89.2°C foi registrada na estação Vostok acima do reservatório²⁶.

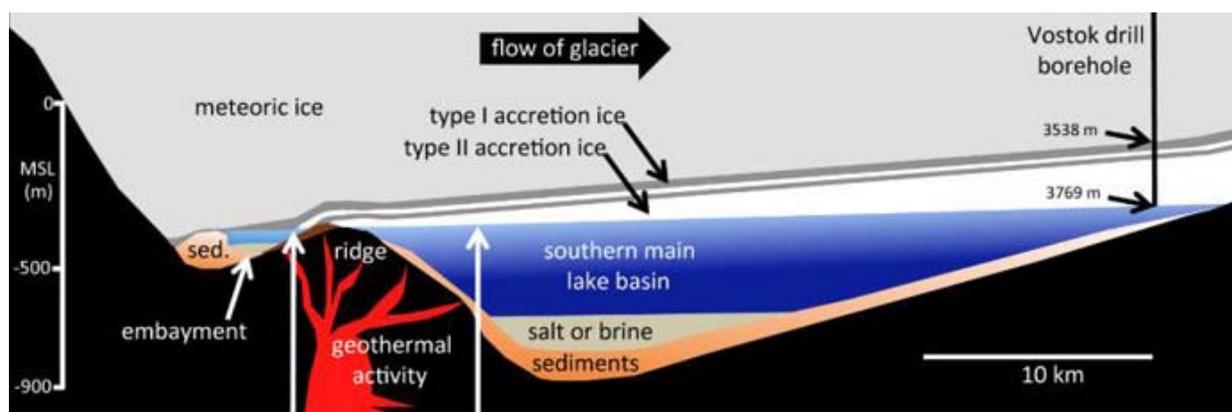


Figura 5. Imagem artística das camadas sob o gelo no Lago Vostok. Fonte: <http://rt.com/news/lake-vostok-bacteria-dna-745/>

O tempo de residência da água no Lago Vostok é cerca de 1 milhão de anos; por comparação, no Lago Ontário (de dimensões semelhantes) este valor é de seis anos. Este fato leva a que o ambiente químico do lago seja extremamente oxidante, com concentrações de oxigênio 50 vezes superiores aos lagos normais²⁵.

3. Classificação dos extremófilos

Os cinco Reinos eram agrupados em duas categorias: Eucariontes e Procariontes. A descoberta de um organismo procariótico que possui um DNA que é bem diferente do DNA bacteriano alterou esta visão da vida. Na década de 1970, um cientista chamado Carl Woese decidiu classificar os organismos com base em diferenças genéticas ao invés de diferenças na aparência visual. Quando Woese começou seus esforços de classificação, ele percebeu que havia distinções entre alguns tipos de organismos que anteriormente tinham sido agrupados com as bactérias, porque todos eles eram procariontes. Pensando que estes organismos mereciam sua própria categoria, ele dividiu o reino Monera de procariontes em **arqueobactérias** (mais tarde chamado de **archaea**) e **bactérias**. Seu terceiro domínio foi reservado para **eukarya**¹³.

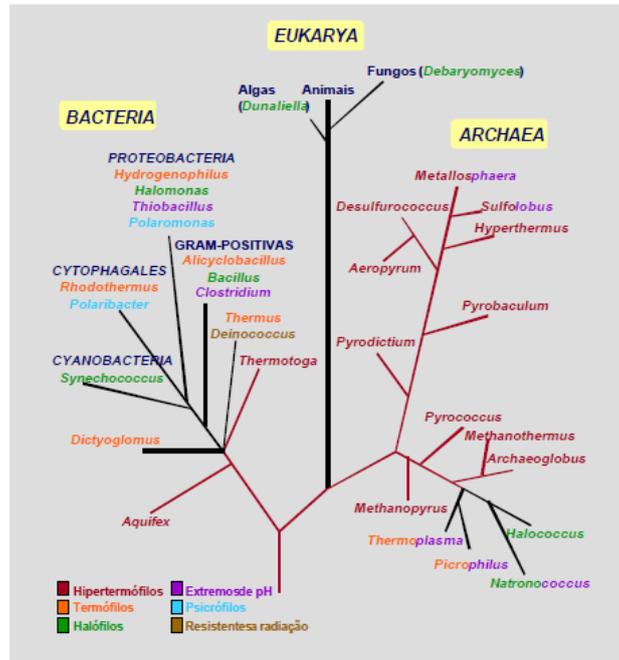


Figura 6. Árvore filogenética segundo Woese et al. 1990, com localização de extremófilo. O tipo de extremófilia está identificado com o código de cores indicado.

Woese descobriu que muitos archaea eram extremófilos e considerou esta evidência no fato de sua origem antiga ("archaea" significa antiga). Archaea é um grupo diversificado de organismos com o seu próprio tipo de rRNA, a partir de bactérias diferentes (rRNA produz polipeptídicos, que ajudam a formar proteínas). Em muitos casos, arqueobactérias extremófilos desenvolveram mecanismos relacionados com as suas células com membranas para protegê-los de ambientes hostis¹³.

Existem vários tipos de extremofilia entre os quais podemos citar os Halófilos, possuindo adaptação em ambiente salinos, os Termófilos e Hipertermófilos, com adaptação a temperatura elevada, os Psicrófilos, que se adaptam em condições de temperaturas muito baixas, os Acidófilos e Alcalófilos, com adaptação a extremos de pH, e os que possuem adaptação a altos níveis de radiação, que são os Microorganismos Radioresistentes¹³. A Tabela 1 mostra diversos tipos de extremófilos e sua classificação.

Tabela 1. Classificação e exemplos de extremófilos. Fonte: Rothschild, Nature 2001.

Environmental parameter	Type	Definition	Examples
Temperature	Hyperthermophile	Growth >80 °C	<i>Pyrolobus fumarii</i> , 113 °C
	Thermophile	Growth 60–80 °C	<i>Synechococcus lividis</i>
	Mesophile	15–60 °C	<i>Homo sapiens</i>
	Psychrophile	<15 °C	<i>Psychrobacter</i> , some insects
Radiation			<i>Deinococcus radiodurans</i>
Pressure	Barophile	Weight-loving	Unknown
	Piezophile	Pressure-loving	For microbe, 130 MPa
Gravity	Hypergravity	>1g	None known
	Hypogravity	<1g	None known
Vacuum		Tolerates vacuum (space devoid of matter)	Tardigrades, insects, microbes, seeds
Desiccation	Xerophiles	Anhydrobiotic	<i>Artemia salina</i> ; nematodes, microbes, fungi, lichens
Salinity	Halophile	Salt-loving (2–5 M NaCl)	Halobacteriaceae, <i>Dunaliella salina</i>
pH	Alkaliphile	pH > 9	<i>Natronobacterium</i> , <i>Bacillus firmus</i> OF4, <i>Spirulina</i> spp. (all pH 10.5)
	Acidophile	low pH-loving	<i>Cyanidium caldarium</i> , <i>Ferroplasma</i> sp. (both pH 0)
Oxygen tension	Anaerobe	Cannot tolerate O ₂	<i>Methanococcus jannaschii</i>
	Microaerophile	Tolerates some O ₂	<i>Clostridium</i>
	Aerobe	Requires O ₂	<i>H. sapiens</i>
Chemical extremes	Gases		<i>C. caldarium</i> (pure CO ₂)
	Metals	Can tolerate high concentrations of metal (metalotolerant)	<i>Ferroplasma acidarmanus</i> (Cu, As, Cd, Zn); <i>Ralstonia</i> sp. CH34 (Zn, Co, Cd, Hg, Pb)

Os acidófilos e os alcalófilos mantêm o pH intracelular próximo a neutralidade, portanto, a maquinaria enzimática não necessita de nenhuma mudança. Os halófilos, que vivem em ambientes próximos a saturação do sal, acumulam íon potássio (atrai menos água que o sódio) no interior da célula, por isso, as proteínas apresentam maior número de aminoácidos carregados negativamente para atrair cátions (íons positivos) hidratados, mantendo a proteína solúvel. Já as proteínas dos hipertermófilos são ricas em aminoácidos carregados que quando interagem formam redes de pontes de sal, uma combinação entre interações eletrostáticas e pontes de hidrogênio, aumentando a força total que mantém a estrutura terciária²².

3.1 Halófilos

Em casos de adaptação a ambientes extremos, os componentes estruturais e celulares do organismo devem sofrer alterações para sobrevivência nesse tipo de meio. É o caso dos halófilos extremos, os arqueões da família *Halobacteriaceae* ou bactérias da família *haloanaerobiales*.

Eles acumulam íons orgânicos (K⁺,Na⁺,Cl⁻) em concentrações elevadas para equilibrarem com a pressão osmótica externa e conservarem sua integridade celular. Juntamente com essa osmoadação, a proteína desses organismos também contém excesso de resíduos de carga negativa, os catalisadores das enzimas precisam de certos níveis de salinidade, além de modificações nos ribossomos.

Os arqueões do gênero *halobacterium* desenvolveram uma parede celular que contém glicoproteínas com elevado número de aminoácidos carregados negativamente e que se estabilizam por interação com os íons de sódio do meio exterior.



Figura 7. Exemplos de Halófilos: esquerda) *Halobacterium* sp. estirpe NRC-1. Cada célula de cerca de 5 um de comprimento. Direita) *halococcus*.¹⁴

Já os *halococcus* têm paredes celulares constituídas por heteropolissacarídeo sulfurado que é estabilizado por altas concentrações de sódio.

O fato de possuírem condições tão específicas para meios extremos de salinidade, também os restringem à esses ambientes, não sendo possível a sua sobrevivência em outros ambientes com níveis inferiores. Isso não acontece com os chamados halófilos moderado, que se utilizam de estratégias mais flexíveis de adaptação, permitindo respostas mais rápidas às flutuações de salinidade do meio. Essas estratégias variam desde acumulação de solutos compatíveis, de baixa massa molecular que mesmo em concentrações elevadas não causam danos. Um exemplo é a microalga do gênero *Dunaliella* que usa o soluto glicerol para contrabalançar a pressão osmótica em ambientes altamente salinos. Essa estratégia não implica em alterações de componentes celulares e permite respostas rápidas à alterações do ambiente.

3.2 Hipertermófilos

Organismos cuja temperatura de Crescimento estritamente acima de 80 ° C. Procariontes. São em sua maioria anaeróbios obrigatórios que utilizam em seu metabolismo, de alguma forma, compostos de enxofre. Os mecanismos de adaptação à altas temperaturas ainda são um grande mistério para ciência, pois não é possível compreender com clareza como as proteínas, por exemplo, as principais biomoléculas do

organismo, não tem sua estrutura danificada nos seres hipertermófilos, assim como ocorre nos outros seres quando a temperatura celular aumenta. Acredita-se que devido às condições termorreduzidas de fontes hidrotermais, como na teoria do mundo de ferro-enxofre, postulada em 1988, os primeiros organismos que existiram na Terra ter sido hipertermófilos¹⁵.

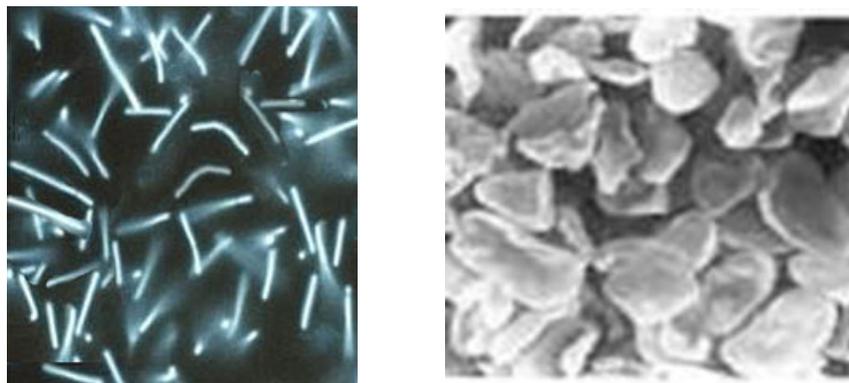


Figura 8. *Methanopyrus kandleri*, um Hipertermófilo descoberto no Golfo da Califórnia²⁷. Direita) Vista microscópica da forma de disco de um *Haloferax volcanii*, um extremófilo isolado do Mar Morto²⁸.

Hipertróficos tem temperatura ótima variando de 80° a 110°. Apresentando com morfologia peculiar, em geral esféricas e irregulares, ou mesmo organismos com ausência de parede celular (*Thermoplasma acidophilum*).

Os hipertemófilos podem ser divididos em pelo menos 4 ordens:

- A Ordem *Thermoproteales* engloba a Família *Thermoproteaceae*, com os gêneros *Pyrobaculum*, *Thermofilum* e *Thermoproteus*, isolados de áreas geotérmicas continentais, e a Família *Desulfurococcaceae*, com os gêneros *Desulfurococcus*, *Pyrodictium*, *Staphylothermus* e *Thermodiscus*, isolados de regiões marinhas geotérmicas profundas e não profundas.
- Ordem *Thermococcales*, com os gêneros *Pyrococcus* e *Thermococcus*, compreende organismos isolados de ambientes marinhos profundos e não profundos.
- Ordem *Sulfolobales*, com os gêneros *Acidianus*, *Desulfurolobus*, *Metallosphaera*, *Stygiolobus* e *Sulfolobus*, apresenta organismos isolados de ambiente marinhos não profundos e águas continentais.
- Ordem *Thermoplasmatales*, isolados de áreas geotérmicas continentais, apesar de apresentarem temperatura máxima de crescimento ao redor de 67 °C, são considerados, para estudo, junto ao grupo dos hipertermófilos (Adams, 1995). Existem ainda alguns organismos não classificados, isolados de ambiente marinho não profundo e profundo, incluindo-se neste grupo os organismos do gênero *Hyperthermus* (Adams, 1995).

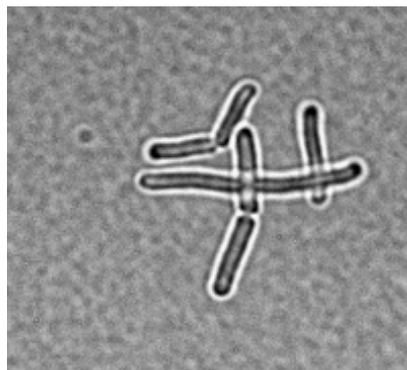
As Archaea hipertermófilas, redutoras do íon sulfato, são alocadas no gênero *Archaeoglobus* e as Archaea hipertermófilas metanogênicas, nos gêneros *Methanococcus*, *Methanopyrus*, *Methanothermus* (Adams, 1995).

3.3 Termófilos

São chamados seres termófilos aqueles cuja temperatura ótima varia de 40° a 70°C com tolerância máxima de 90°C. Temperatura como essas são encontradas em águas termais.

Alguns Termófilos, como a *Sulfolobus*, obtêm a energia por oxidação de enxofre, e são, por conseguinte, bactérias quimiossintéticas¹⁷. Mas, em geral, são todos considerados extremófilos e resilientes. Os microrganismos termófilos não são capazes de crescer em temperaturas abaixo de 45 °C.¹⁶ No entanto, existem microrganismos termófilos facultativo, que são microrganismos que conseguem

crescer a temperaturas abaixo de 45 °C, como por exemplo, a bactéria *Bacillus stearothermophilus* que cresce otimamente entre 55 e 65°C, mas também apresenta um pequeno crescimento em temperaturas em torno de 30°C. ¹⁶



Fonte 9: *Bacillus stearothermophilus* (*Geobacillus stearothermophilus*) é uma bactéria utilizada como indicador em monitoramento e validação de ciclos de esterilização por calor úmido, realizado em equipamentos denominados de autoclaves ¹⁶.

3.4 Psicrófilos

São organismos que necessitam de baixas temperaturas para sobreviverem. Eles necessitam de temperatura ideal para crescimento em aproximadamente 15°C, com máxima de 20°C e mínima de 0°C. Essa adaptação pode ser explicado através do alto conteúdo de ácidos graxos insaturados que ajuda a manter o estado semifluido da membrana a baixas temperaturas, não inibindo as funções das membranas e ainda protege a célula do congelamento à temperaturas acima da máxima. Nesses casos, o congelamento previne o crescimento microbiano, isto não necessariamente causa a morte dos microrganismos.

Um exemplo de Psicrófilos é a *Chlamydomonas nivalis*, uma alga verde que deve a sua cor vermelha a um pigmento vermelho brilhante chamado carotenoide, que protege o cloroplasto da radiação ultravioleta visível intensa e também o calor de absorção. ¹⁸ Elas são abundantes nos mares polares e de sedimentos do fundo do oceano, onde há trevas e a temperatura nunca superior a 4 °C. Elas também crescem em geleiras alpinas e na neve, muitas vezes em concentração suficiente para mancharem o gelo com cores exóticas.

Este tipo de neve é comum durante o verão nas regiões polares alpinas e costeiras em todo o mundo, como a Serra Nevada de Califórnia. Quando as temperaturas sobem na primavera e a neve derrete, a alga esporula antes de morrer e os seus esporos, ricos em carotenoides, mancham a neve com um vermelho brilhante. Em alguns locais atribuem o nome "Neve Melancia" a este fenômeno. Quando a neve finalmente derrete, esses esporos podem permanecer tão coloridos em todo o verão até que as primeiras neves chegam, e depois germinam para abrir caminho para uma nova geração de algas psicrófilas ¹⁹.



Figura 10. Direita) *Chlamydomonas nivalis*, uma alga verde que vive em gotas de água líquido disperso nos flocos de neve. Esquerda) Ilustração de uma "neve melancia". ¹⁹

3.5 Acidófilos e alcalófilos

Acidófilos são micro-organismos que crescem em ambientes altamente ácidos (pH inferior a 3) e são encontrados em todos os três domínios da vida: Archaea, bactérias e Eucarya. Tais organismos prosperam em fontes de ácido de enxofre e em associação com atividades de mineração onde a oxidação microbiana de pirita e outros compostos reduzidos de enxofre levam à formação de ácido sulfúrico²⁰. Os ambientes ácidos naturalmente surgem de atividades geoquímicas tais como a produção de gases sulfurosos de emanções vulcânicas.

O *Ferroplasma acidiphilum* é uma espécie de acidófilo ferro-oxidante, imóvel pois não possui flagelos. Vive em ambientes de metais pesados que contém altos níveis de ferro e enxofre com pH ótimo em 1,7. Além de utilizar o ferro com sua fonte de energia, essa espécie também o utiliza como elemento essencial para estrutura de organizacional da maioria de suas proteínas celulares.



Figura 11. *Ferroplasma acidiphilum*, uma exemplo de acidófilo.

Os organismos acidófilos e os alcalófilos são tão adaptados a ambientes com valores de pH extremos, de aproximadamente 0 e 11,5 respectivamente, que são incapazes de se reproduzirem em meios com pH próximo da neutralidade. Porém, apesar desse nível de adaptação, ainda não foi elucidado qual o mecanismo que consegue manter a homeostase do pH, se o pH intercelular dos acidófilos varia entre 5 e 7 e dos alcalófilos entre 7 e 9, isto é, dentro dos níveis encontrados dos mesófilos que habitam meios ácidos e alcalinos respectivamente.

Como os componentes celulares não sofreram grandes alterações devido a semelhança de acidez ou alcalinidade, dependendo da situação, os principais estudos sobre a adaptação desses organismos se concentram em alterações nas membranas celulares.

Micro-organismos acidófilos mantêm o seu pH intracelular perto de neutralidade e sua membrana citoplasmática pode apoiar gradientes de prótons até cinco ordens de grandeza; o seu potencial de membrana é frequentemente invertido em comparação com neutrófilos e alcalófilos, com uma carga positiva intracelular.

3.6 Micro-organismos radiorresistentes

Bactérias dos gêneros *Deinococcus* e *Rubrobacter* tem a capacidade notável de adaptação a ambientes com doses elevadas de radiações gama ou ultravioleta.(Ferreira et al 1999). Elas são capazes de sobreviver a doses de radiação gama milhares de vezes mais altas do que as disponíveis na Terra por meios naturais. *Deinococcus radiodurans* é uma bactéria que suporta altas doses de radiatividade²¹.

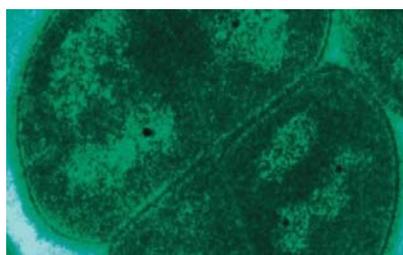


Figura 12. Imagen do *Deinococcus radiodurans* tomada com um microscópio de transmissão de electrons²¹.

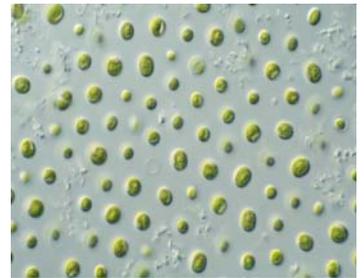
É considerado um dos organismos mais resistentes conhecidos até hoje. Sobrevive a situações de frio, vácuo, desidratação e acidez. Tem como principal característica os mecanismos de reparadores de DNA extremamente eficiente encontrado nesses organismos. Essa característica é muito favorável à adaptações em qualquer situação de ambiente extremo.

4. Mais Exemplos de Extremófilos

Dunaliella algae

A microalga do gênero *Dunaliella* usa o soluto glicerol para contrabalancear a pressão osmótica em ambientes altamente salinos. Essa estratégia não implica em alterações de componentes celulares e permite respostas rápidas à alterações do ambiente. Em janeiro de 2011, o cientista Brian A.

Schubert publicou um estudo na revista da Sociedade Geológica Americana onde encontrou bactérias datadas em 34 mil anos enterrado em fluidos no interior de minerais de Death Valley e Saline Valley, no estado americano da Califórnia. As bactérias estão vivas, mas a vida delas é limitada à sobrevivência, pois não usam energia para nadar e nem para se reproduzirem. Os cientistas também conseguiram fazer com que as bactérias voltassem a se reproduzir após dois meses e meio em estado de **letargia**.



Pyrococcus furiosus

Organismo com temperatura ótima de crescimento a 100°C e um dos poucos organismo conhecidos que possui enzimas contendo tungstênio, um elemento raro em moléculas biológicas.

Pyrococcus furiosus é conhecida pela sua duplicação rápida, que gira em torno de 37 minutos sob condições ótimas.

O nome *Pyrococcus* significa "fireberry", em grego, para se referir a forma arredondada e capacidade de crescer em temperaturas de cerca de 100 graus Celsius. As espécies *furiosus* cujo nome significa "apressar" em latim, e refere-se ao tempo de duplicação do extremófilo.



Tardígrados

São animais microscópicos encontrados em líquenes ou musgos, no solo, no topo de montanhas e no leito oceânico, a uma profundidade de quatro mil metros. Como os musgos onde vivem são predispostos à dessecação intensa, algumas espécies de tardígrados podem sobreviver até 10 anos sem umidade.

Por também apresentar uma incrível resistência à danos causados por raios ultra violetas o ecologista Ingemar Jönsson, da Universidade Kristianstad, na Suécia, e seus colegas enviaram ao espaço duas diferentes espécies de tardígrados que se desenvolvem em musgos - *Richtersius coronifer* e *Milnesium tardigradum*- e seus ovos na missão Fóton M3 da Agência Espacial Européia, em setembro passado. Enquanto orbitavam a Terra em uma altitude de mais de 260 quilômetros, os tardígrados foram expostos ao vácuo do espaço por 10 dias. Apesar de alguns terem sido protegidos da luz solar, outros foram expostos à radiação solar ultravioleta: UV-A (ondas longas) e UV-B (ondas médias).

Segundo os pesquisadores apenas 10% dos tardígrados expostos à radiação e ao vácuo se recuperaram após retornar a um ambiente aquático - e nenhum dos ovos expostos à radiação foram incapazes de gerar novos seres.

Esses resultados são os primeiros passos para testes com a capacidade de sobrevivência de outras espécies no espaço.



Metazoa Spinoloricus

Um animal loricífero identificado por Roberto Danovaro e sua equipe, como uma espécie não descrita do gênero *Spinoloricus*, que nos sedimentos do mar mediterrâneo é o primeiro organismo multicelular que completa seu ciclo de vida em condições de permanente anoxia, isto é, sem oxigênio.

Para descobrirem essa nova espécie, os pesquisadores realizaram 3 expedições oceanógrafas de 1998 a 2008 a procura de vida em ambientes de ambientes extremos localizados a mais de 3000m de profundidade no mar mediterrâneo.

Essa nova espécie possui claras diferenças com as outras Metazoas, a mais significativa é a ausência de mitocôndria, organela responsável em converter oxigênio em açúcar para gerar energia para as células. Enquanto isso, a nova locífera possui organelas que se assemelham a hidrogenossomas, organela encontrada em eucariontes unicelulares que produzem energia sem oxigênio.



5. Zona de habitabilidade extremófila

A descoberta de organismos como os extremófilos que vivem em condições tão extremas vem despertando muitas dúvidas e discussões a respeito da possibilidade de encontrar alguma forma de vida fora da Terra.

Cogita-se que estes seres estudados até aqui também possam viver, de maneira análoga à da Terra, em regiões consideradas inóspitas do universo. Tal conceito estende a zona de habitabilidade (ZH) a um patamar mais amplo, abarcando regiões consideradas não tão promissoras num primeiro momento, como proposto no esquema abaixo.

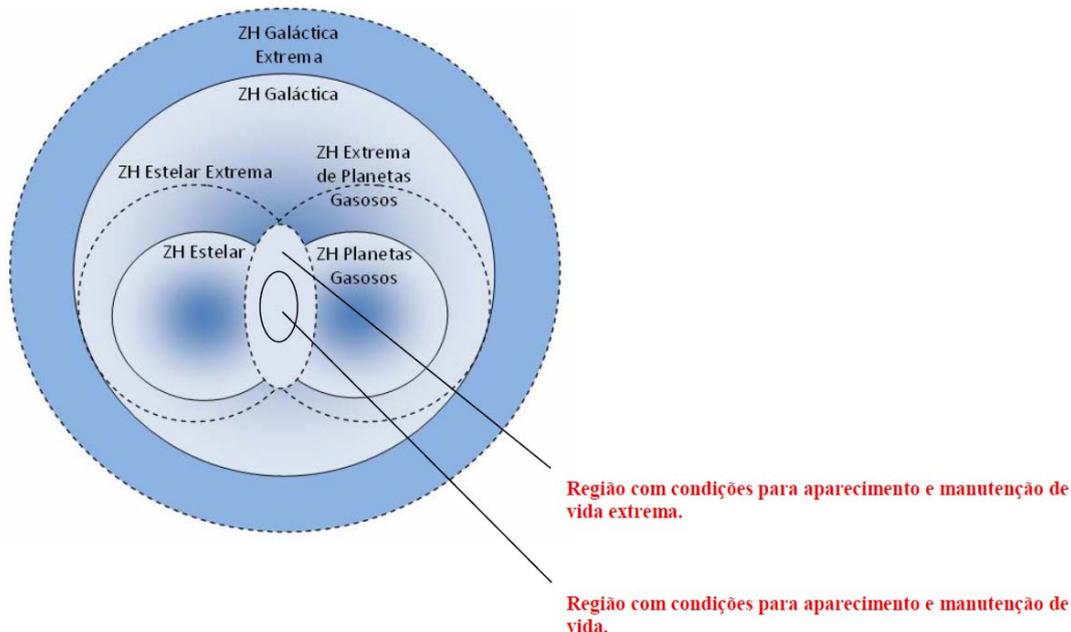


Figura 13. Zona de Habitabilidade extrema com destaque para a zona de habitabilidade para microorganismos extremófilos.

A seguir destacamos alguns ambientes fora da terra onde especula-se que poderiam abrigar alguma formas de vida como os extremófilos, já que esses ambientes possuem algumas características "semelhantes" aos ambientes aqui na terra onde esses seres vivos conseguem sobreviver.

É preciso destacar aqui que para a sobrevivência de qualquer forma de vida como a conhecemos depende de vários fatores entre elas a presença de água no estado líquido, já que ela até é abundante em alguns ambientes espaciais, mas está congelada e, portanto, indisponível para os seres vivos.

5.1 Europa (satélite de Júpiter)

Com uma superfície coberta de gelo, evidências de água líquida abaixo da superfície, e temperaturas extremamente baixas (variação de $-223,15\text{ °C}$ até $-148,15\text{ °C}$), a lua Europa de Júpiter poderia ser um ambiente onde é possível o crescimento de organismos psicrofílicos. Nesse satélite, há a presença de fontes hidrotermais nas profundezas do oceano abaixo da superfície, um ambiente onde Termófilos e Hipertermófilos poderiam sobreviver. Bactérias como a *Deinococcus radiodurans*, devido às características de Europa, também poderia se desenvolver por ali.

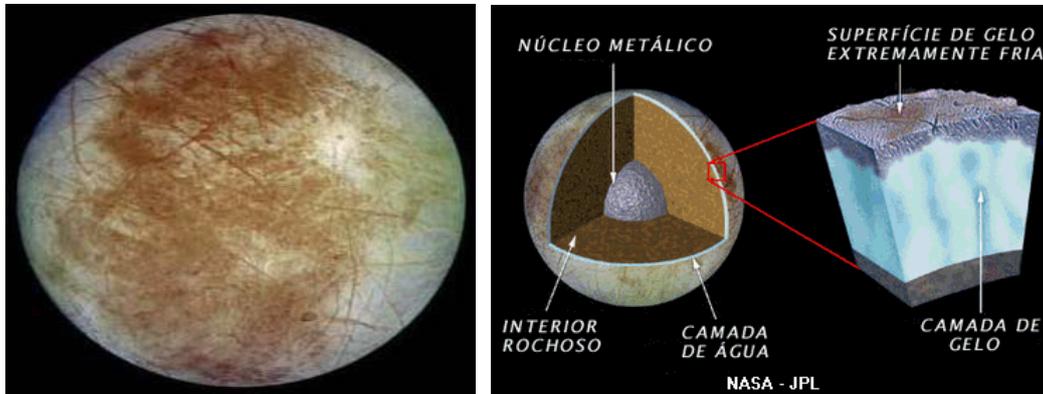


Figura 14. Direita) Vista de Europa, um dos satélites galileanos de Júpiter. **Fonte:** NASA. Esquerda) Ilustração da estrutura geológica de Europa. O núcleo de Europa deverá ser metálico, rodeado por rocha e esta rocha rodeada por água líquida sob uma capa de gelo. **Fonte:** NASA.

Reforçamos aqui que isso são hipóteses, já que são precisos estudos mais detalhados sobre os ambientes extraterrestres como o de Europa para que se possa afirmar algo desse tipo.

5.2 Titã (lua de saturno)

Titã, a maior lua de Saturno é outro mundo com potencial para abrigar formas de vida. A temperatura por lá é de -179 graus Celsius, uma pressão atmosférica de 1,5 da pressão da atmosfera terrestre e uma atmosfera composta principalmente por nitrogênio (95%) e Metano (5%), além de outras características com potencial astrobiológico. Essa lua possui grande reservatório subterrâneos de água líquida, um solvente que tanto formas típicas de vida como extremófilos necessitam para seu crescimento.

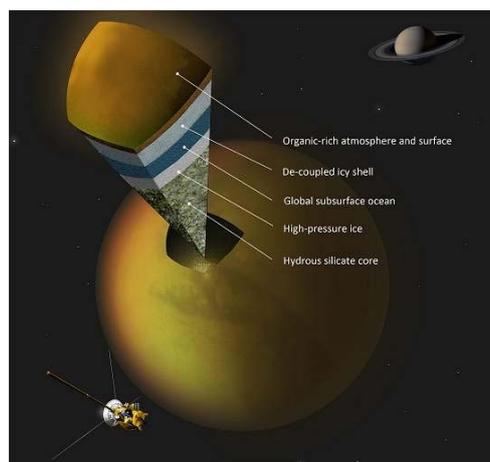


Figura 15. A composição do interior de Titã foi deduzida a partir de medições gravitacionais realizadas pela sonda Cassini. [Imagem: A.Tavani].

A NASA informou que o oceano dentro de Titã pode ser tão salgado como o Mar Morto, um ambiente para Halófilos crescerem felizes. Com a atividade vulcânica em Titã, muitos Termófilos e

Hipertermófilos poderiam se desenvolver nesse ambiente, assim como psicrofílos em suas baixas temperaturas, bem como, outras espécies de seres que vivem em ambientes extremos como os que são encontrados na terra e que se "assemelham" aos dessa lua.

5.3 Enceladus (satélite de saturno)

Encéladus, uma das luas de Saturno, é outro ambiente com características semelhantes, guardadas as proporções, ao que muitos extremófilos na terra vivem. Essa lua possui uma superfície coberta pelo gelo, oceano de água interno, vulcanismo, gêiseres expelindo matéria orgânica para o ambiente a partir do interior, elementos dos quais muitos micro-organismos extremófilos utilizariam para o seu desenvolvimento.

A Cassini detectou sais de sódio em grãos de gelo do anel mais externo de Saturno, os quais são expelidos do interior de Enceladus pela sua atividade vulcânica. Esses jatos provêm de bolsas de água (acima de 0 graus centígrados) próximas à superfície.

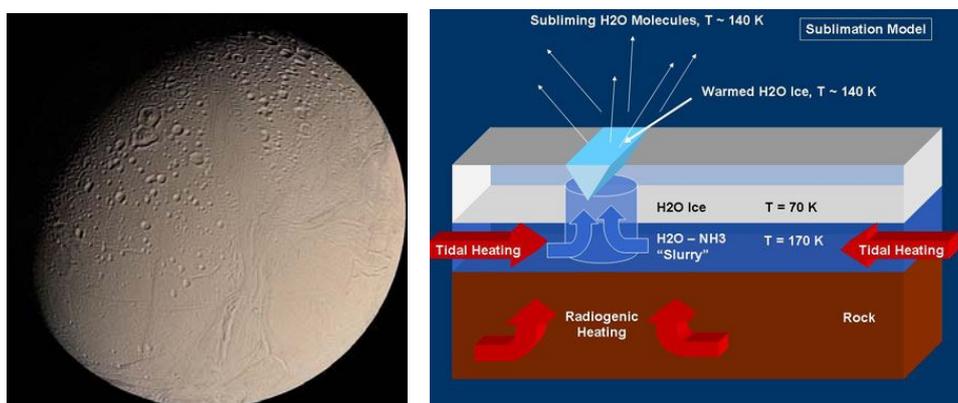


Figura 16. Imagem de Enceladus. Fonte: NASA. Modelo de possível atividade geológica de Enceladus liberando gases para a atmosfera dessa lua. (NASA). Imagem artística de criovulcanismo de Enceladus.

Assim, no mar de água salgada, micro-organismos como Halófilos poderiam, hipoteticamente, se nutrir desse ambiente e outros micro-organismos como Termófilos e Hipertermófilos se beneficiariam do interior geologicamente ativo dessa lua. Psicrofílos, poderiam se desenvolver no ambiente frio da superfície dessa lua, desde que, como dissemos, sejam garantidos outras condições.

5.4 Marte

De todos os planetas dos Sistema solar, Marte é aquele considerado pelos cientistas o que possui maior potencial para abrigar alguma forma de vida como conhecemos. Esse planeta do sistema solar possui temperaturas que variam de $-143\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ pressão atmosférica de $0,636\text{ }\mu\text{Pa}$ e uma atmosfera composta principalmente por dióxido de carbono (95,97%), além de outros componentes como hidrogênio, carbono, metais, etc. Há evidências de água e vulcões, entre outros processos geológicos no planeta vermelho.

A radiação em Marte é muito elevada, o que gera processos oxidantes. Dados fornecidos pelas sondas que têm explorado Marte nos revelaram o alto teor de minério de ferro presente no planeta. Assim, hipoteticamente, ele poderia abrigar espécies acidófilas, as quais se desenvolvem em ambientes com essas características.

Na terra microrganismos conhecidos como metanógenos produzem metano ao consumir hidrogênio, dióxido de carbono ou monóxido de carbono.



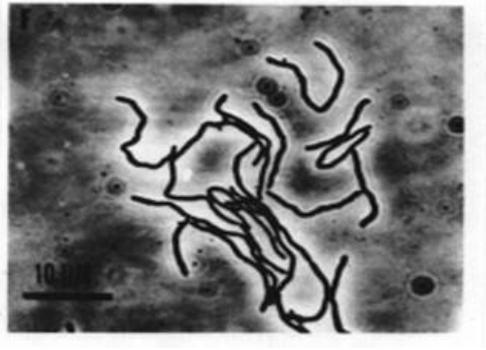


Figura 17. *Methanogens*, micro-organismos do planeta terra que produzem gás metano.

Sendo assim, micro-organismos como esses encontrados em ambientes extremos da terra encontrariam um ambiente propício para seu desenvolvimento em Marte. Lembramos sempre que a existência de possíveis extremófilos nesses ambientes passa apenas por especulação, já que para a vida existir em ambientes fora da terra, como os destacados nesse material, ela deverá depender de vários fatores, sejam eles físicos, químicos, biológicos, etc.

6. CONCLUSÃO

A possibilidade de desenvolvimento de vida em ambientes extremos como nas áreas de habitabilidade extrema do nosso planeta tais como a Antártida, Yellowstone Park, Alaska (tanto nos Estados Unidos) ou em minas de Rio Tinto (Espanha), aumenta a expectativa da ciência sobre a capacidade de habitabilidade do universo. A razão do estudo de extremófilos na Terra é uma forma de entender melhor a grande variedade de condições sob as quais a vida pode evoluir e sobreviver, assim como nos ajudar a compreender alguns dos mecanismos que os organismos podem empregar para sobreviver em diferentes condições ambientais extremas.

Portanto, a investigação sobre esses micro-organismos que vivem em condições tão extremas levanta dúvidas e discussões a respeito da possibilidade de encontrar alguma forma de vida fora da Terra. Todas essas hipóteses da presença de alguma espécie fora do ambiente terrestre ainda não foram comprovadas. Somente um estudo mais detalhado de todo o contexto do ambiente pode determinar se existe vida ou se há, de fato, condições para a formação e evolução de vida nesses ambientes extremos extraterrestres.

REFERÊNCIAS

- [1] The first metazoa living in permanently anoxic conditions - Roberto Danovaro
- [2] Extremófilos: microrganismos à prova de agressões ambientais extremas : Helena Santos¹, Pedro Lamosa¹, Milton S. da Costa²
- [3] Tardigrades survive exposure to space in low Earth orbit K. Ingemar Jönsson
- [4] Metazoa *Spinoloricus* em : <http://phys.org/news189836027.html>
- [5] Extremófilos em : <http://hypescience.com/extremofilos-8-formas-de-vida-bizarras/>
- [6] Extremófilos em : http://www2.uol.com.br/sciam/noticias/extremofilos_sobrevivem_as_condicoes_adversas_do_espaco.html
- [7] *Pyrococcus* em Wikipedia: http://pt.wikipedia.org/wiki/Pyrococcus_furiosus
- [8] *Deinococcus* em Wikipedia: http://pt.wikipedia.org/wiki/Deinococcus_radiodurans

- [9] Life in extremes environments em: http://www1.univap.br/drauzio/index_arquivos/MB003.pdf
- [10] http://microbewiki.kenyon.edu/index.php/Sulfolobus_acidocaldarius
- [11] Life in extreme environments. **Lynn J. Rothschild & Rocco L. Mancinelli**, NATURE, 409, 22 FEBRUARY 2001 .
- [12] <https://www.kevinabarnes.com/extreme-life/>
- [13] <http://science.howstuffworks.com/life/cellular-microscopic/extremophile1.htm>
- [14] http://www.lookfordiagnosis.com/mesh_info.php?term=Halococcus&lang=3
- [15] <http://www.ecured.cu/index.php/Hiperterm%C3%B3filo>
- [16] <http://www.engquimicasantosp.com.br/2013/10/microrganismos-termofilos.html>
- [17] http://pt.wikipedia.org/wiki/Organismo_term%C3%B3filo
- [18] http://en.wikipedia.org/wiki/Watermelon_snow
- [19] <http://jardindegaia.blogspot.com.br/2015/05/psicrofilos-y-psicrotolerantes-hadas-y.html>
- [20] <http://www.els.net/WileyCDA/ElsArticle/refId-a0000336.html>
- [21] http://www.cienciaplor.com/divulgacion/extremofilos-esos-seres-pequenos-que-nos-ayudarian-entender-vida-extraterrestre_2014012800083.html
- [22] <http://ead.hemocentro.fmrp.usp.br/joomla/index.php/noticias/adoteempauta/507-a-vida-em-ambientes-extremos-biologia-molecular-de-extremofilos>
- [23] <http://www.astrobio.net/topic/origins/origin-and-evolution-of-life/os-tres-dominios-da-vida/>
- [24] http://en.wikipedia.org/wiki/Great_Salt_Lake
- [25] http://pt.wikipedia.org/wiki/Lago_Vostok
- [26] <http://rt.com/news/lake-vostok-bacteria-dna-745/>
- [27] Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Methanopyrus>
- [28] http://gcat.davidson.edu/mediawiki-1.19.1/index.php/Haloferax_volcanii