

EFEITOS DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA SOLAR EM EXTREMÓFILOS RADIORRESISTENTES DA ESPÉCIE *Deinococcus radiodurans*

Arthur Lemes Fuller e Adriana Valio

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

Astrobiologia é a área da ciência responsável pela compreensão da vida, assim como sua origem e evolução na Terra e no restante do Universo, tendo como um dos principais objetivos a busca por vida em outros planetas. Em nosso Sistema Solar, levando em consideração as condições necessárias para o surgimento de vida, pelo menos como a conhecemos, Marte é um candidato com um ótimo potencial, porém, organismos muito sensíveis não seriam capazes de sobreviver e proliferar na superfície do planeta, devido às suas condições climáticas e geológicas. Mas existem algumas espécies de microrganismos, chamados extremófilos, que são capazes de sobreviver a condições extremas, como a bactéria *Deinococcus radiodurans*, que se destaca pela sua resistência à radiação, superando qualquer outro organismo conhecido. Tendo em vista que a atmosfera de Marte é extremamente rarefeita e, conseqüentemente, a radiação que entra em contato com a superfície do planeta é fatal para a maioria dos seres vivos, estudar a capacidade de sobrevivência de microrganismos extremófilos em condições similares às de Marte é uma ótima forma de descobrir se é possível a origem de vida em planetas com características climáticas e geológicas extremas.

Palavras-chave: Astrobiologia. Extremófilos. Microrganismos. Marte. Radiação.

ABSTRACT

Astrobiology is the science responsible for understanding life, as well as its origin and evolution on Earth and in the rest of the Universe, having as one of its main goals the search for life on other planets. In our Solar System, considering the conditions necessary for the emergence of life, at least as we know it, Mars is a candidate with a great potential. However very sensitive organisms would not be able to survive and proliferate on the surface of the planet, due to its climatic and geological conditions. But there are some species of microorganisms called extremophiles, which can survive extreme conditions, such as the *Deinococcus radiodurans* bacterium, which stands out for its resistance to X-ray radiation, surpassing any other known organism. Since the atmosphere of Mars is extremely thin, and consequently the radiation that reaches the planet's surface is fatal to most living beings,

studying the survivability of extremophile microorganisms in conditions like those on Mars is a good way to find out if the origin of life is possible on planets with extreme climatic and geological characteristics.

Keywords: Astrobiology. Extremophiles. Microorganisms. Mars. Radiation.

1 INTRODUÇÃO

A busca por vida fora da Terra é um tema explorado há décadas, com o objetivo de responder se estamos sozinhos ou não no Universo. Com esse tema surge a ciência da Exobiologia, que hoje conhecemos como Astrobiologia, onde se procura compreender os mecanismos biológicos e as condições necessárias para que a vida possa existir e se proliferar em ambientes além de nosso planeta.

Tendo como base as formas de vida que encontramos na Terra e as características climáticas e geológicas de outros planetas. Em Marte, por exemplo, praticamente todas as espécies conhecidas não seriam capazes de sobreviver em um ambiente tão inóspito. Isso por conta de diversos fatores como a falta de água, a composição do solo e uma atmosfera que é extremamente rarefeita, o que significa que não existe nenhuma proteção impedindo que a radiação energética do Sol chegue até a superfície do planeta.

Mesmo com todas as suas características negativas para o surgimento de vida, Marte continua sendo um excelente candidato, no nosso Sistema Solar, com respeito à busca por formas de vida. O motivo é a existência, aqui na Terra, de microrganismos conhecidos como extremófilos. Estes possuem uma resistência maior que a maioria dos organismos, o que permite que possam sobreviver e até mesmo se proliferar em ambientes com níveis extremos de radiação, temperatura e pressão, entre outros.

Em Marte, a radiação ultravioleta (UV) é um dos principais obstáculos para o surgimento de vida. Por isso, estudar a bactéria *Deinococcus radiodurans* é a melhor forma de descobrir se é possível a existência de vida em planetas inóspitos como Marte, visto que este é conhecido como um microrganismo radio resistente e a forma de vida com maior resistência às radiações UV e X conhecida.

Simulando um ambiente com características similares às de Marte, como composição atmosférica e emissão de radiação solar, é possível descobrir se organismos com características similares a esta bactéria poderiam sobreviver em outros planetas.

2 METODOLOGIA

Os métodos para o desenvolvimento desta pesquisa se basearam na procura e leitura de material científico com foco em temas como Astrobiologia, Biologia, Microbiologia, Bioquímica, Astrofísica e Geologia. Com isso, foi possível coletar informações extremamente importantes. Entretanto, o tema desta pesquisa é pouco conhecido, o que dificultou o andamento da pesquisa. Por isso, foi necessária a busca por temas específicos, divididos por áreas do conhecimento diferentes, para que no final pudesse ser feita uma síntese de todo o material coletado, desde o entendimento do funcionamento das diversas formas de vida, até as características da bactéria *D. radiodurans* e o que faz com que esse microrganismo seja importante na busca por vida em outros planetas. A seguir faremos um breve resumo dos textos consultados.

2.1. Leitura do livro “Astrobiologia: uma ciência emergente”

Publicado em 2016 pelo IAG/USP, o livro passa uma visão geral sobre a Astrobiologia, apontando sua importância, história e as diversas áreas que se encaixam no tema, como Biologia, Astronomia, Química etc. A leitura do material serviu como ponto de partida para a pesquisa, permitindo o entendimento de todo o conteúdo básico necessário para o desenvolvimento deste artigo, em seus 16 capítulos envolvendo os fatores necessários para o surgimento de vida, a exploração do universo, os chamados exoplanetas (incluindo os planetas habitáveis) e os extremófilos.

2.2. Revisão de material envolvendo o efeito da radiação em seres vivos

Como o foco da pesquisa é descobrir quais são os efeitos da radiação emitida pelo Sol em organismos vivos, principalmente em extremófilos como a *D. radiodurans*, é importante buscar quais são as várias consequências para os seres vivos quando expostos a taxas elevadas de radiação. Tendo como base, primeiramente, a radiação que chega até a superfície do planeta Terra, para que os dados sejam utilizados como comparação para as taxas de radiação observadas em Marte e em outros planetas.

2.3. Buscar por informações sobre a bactéria *D. radiodurans*

Os extremófilos são importantes para os estudos envolvendo Astrobiologia, e por isso conhecer suas características, principalmente as que permitem que sejam tão resistentes a diversas condições extremas envolvendo pressão, temperatura, radiação etc. E como a *D. radiodurans* é o organismo que foi utilizado como objeto de pesquisa, principalmente pela sua resistência a níveis extremamente elevados de radiação, é necessário dominar o tema.

2.4. Revisão sobre Marte e suas características para futuras simulações

Marte é o principal planeta do nosso Sistema Solar estudado na Astrobiologia, principalmente pelo seu passado, que se se assemelhava à Terra em diversos aspectos, como gravidade, temperatura e presença de água. Isso pode significar que em algum momento existiu vida em Marte, e talvez ainda possa existir. Por isso, simular as condições do planeta, como composição do solo e da atmosfera, temperatura e principalmente a quantidade de radiação que chega à superfície é extremamente importante. Então deve-se compreender as características de Marte para estudar a possibilidade da existência de vida em sua superfície, utilizando os dados coletados sobre o planeta e sobre a bactéria *D. radiodurans*.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A Astrobiologia é uma ciência recente e multidisciplinar. Desta forma, embora não exista ainda uma quantidade de publicações específicas, as informações necessárias podem ser encontradas em outras linhas de pesquisa.

3.1. Astrobiologia e os extremófilos

Atualmente, a Astrobiologia tem como objetivo compreender melhor a vida no nosso planeta, como a vida surgiu e quais são as condições adequadas para o surgimento de vida em um planeta (BLUMBERG, 2003). Para tanto é necessário que tenhamos a Terra como um modelo para estudar os outros planetas e a possibilidade de existir vida nos mesmos.

Sabemos que a Terra apresenta ambientes com condições extremas em relação a diversos aspectos. Essas características são importantes porque se assemelham a outros planetas, o que dá espaço para estudar a biologia de organismos que sobrevivem em tais ambientes (GALANTE *et al.*, pp. 23-42).

Os planetas habitáveis, pelo menos os que se assemelham à Terra, precisam apresentar algumas características. Um fator importante é o surgimento de água, que com base no que aconteceu na Terra, deve ocorrer durante o período de impactos de cometas e asteroides na superfície do planeta ocorrido logo após a sua formação. Muitos cometas armazenavam água na forma condensada.

Deve-se levar em consideração também a zona habitável (ZH), que é definida como a região ao redor de uma estrela onde a temperatura é suficiente para que a água se mantenha em estado líquido na superfície de um planeta (Figura 1). E por fim, deve existir um processo de efeito estufa no planeta, que regula a temperatura da superfície do planeta, e é possível devido à sua composição atmosférica (GALANTE *et al.*, pp. 75-93).

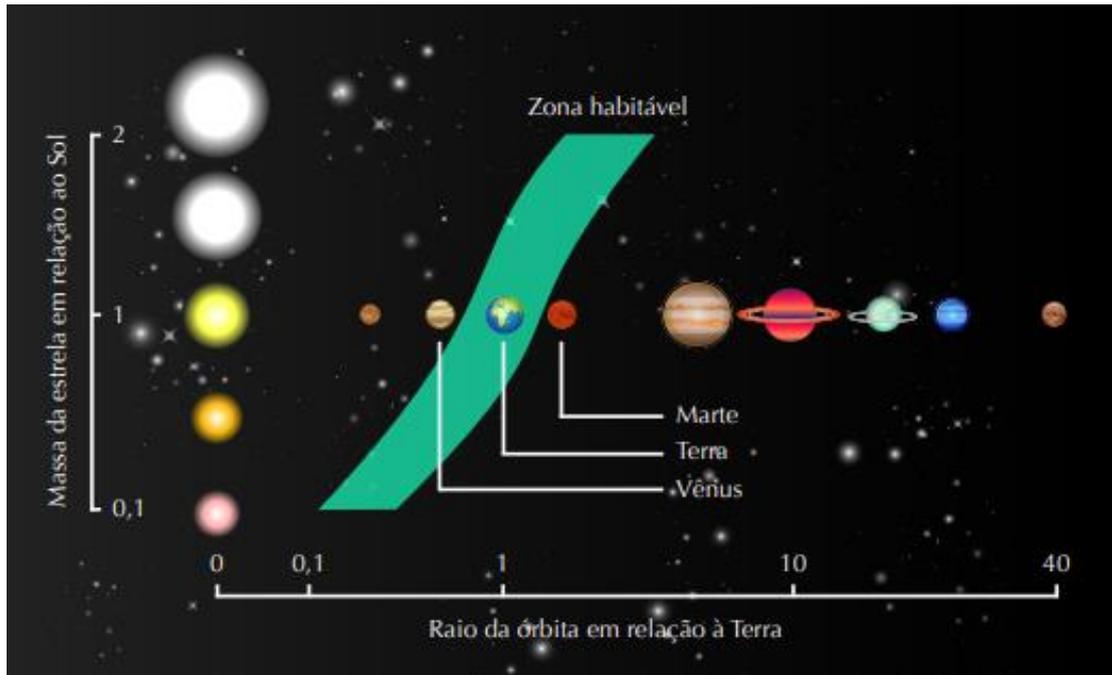


Figura 1: Representação da Zona Habitável do Sistema Solar e da massa estelar em relação ao Sol. Fonte: GALANTE *et al.*, pp. 76 (2016)

Existem microrganismos que são importantes em estudos realizados na área da Astrobiologia, que envolvem habitabilidade em outros planetas, principalmente aqueles que apresentam características que impedem o surgimento de vida, como Marte (ROTHSCHILD; MANICINELLI, 2001). Estes são chamados de extremófilos, e são capazes de sobreviver em ambientes com condições extremas, ou seja, com extremos de temperatura, pH, salinidade, pressão e radiação (GALANTE *et al.*, pp. 155-171).

Extremófilos são divididos em algumas categorias, que se baseiam em suas características metabólicas e nos locais onde são encontrados. Por isso, realizar o uso do genoma desses organismos é de extrema importância para a busca por vida extraterrestre. Pois é preciso entender o funcionamento desses organismos, como seu metabolismo, para entender quais as condições necessárias de um planeta para abrigar vida semelhante a que encontramos na Terra.

Como extremófilos vivem normalmente em ambientes com condições não convencionais, precisam manter seu metabolismo em funcionamento de formas diferentes. Metabolismo são todas as transformações e reações químicas que ocorrem dentro de um organismo vivo, que normalmente envolvem enzimas que realizam síntese e degradação de moléculas, e na maioria dos casos são dependentes de oxigênio, sendo que praticamente não existem organismos multicelulares anaeróbicos no nosso planeta (GALANTE *et al.*, pp. 173-196)

Para que tenhamos a chance de encontrar formas de vida em outros corpos celestes, devemos começar a pensar em tipos de metabolismos não convencionais, e existem algumas categorias para diferenciar estes organismos, como quimiolitótróficos, os organismos que realizam fotossíntese anoxigênica, e os organismos dependentes da radiólise, que adquirem a energia necessária para sua sobrevivência a partir da decomposição de compostos radioativos. E pensando que é possível a existência de formas de vida em outros planetas, devemos levar em consideração que esses organismos podem possuir metabolismos energéticos não convencionais em relação aos que conhecemos em nosso planeta (GALANTE *et al.*, pp. 173-196).

3.2. Radiação e seu impacto no surgimento de vida

Um dos principais problemas que afetam a existência de vida é a taxa elevada de radiação solar que atinge o solo. Na Terra, é possível encontrar bactérias de diferentes espécies em desertos, porém elas dificilmente estão expostas à radiação solar, e são encontradas, normalmente, em colônias situadas a alguns centímetros abaixo do solo, ou na base de rochas, que fornecem proteção contra a radiação (DAVILA; SCHULZE-MAKUCH, 2016).

Tendo como base a estrela anã Trappist-1, que possui sete planetas em sua órbita, sendo que três deles estão na zona habitável que fica muito próxima da estrela, é possível compreender os efeitos da radiação UV emitida pelas explosões estelares da Trappist-1, que são intensas e muito frequentes. Essas explosões liberam grandes quantidades de radiação ultravioleta (UV), afetando a atmosfera do planeta de diversas formas, resultando na perda da massa atmosférica, modificações da composição química e a instabilidade de diferentes camadas da atmosfera (ESTRELA; PALIT; VALIO, 2020).

Essas explosões, que modificam as condições ecológicas de um planeta, dificultam a sobrevivência de seres vivos, incluindo extremófilos, que mesmo apresentando diversas resistências, são afetados por essa alteração climática causada pelas altas emissões de radiação, e isso influencia na importância dos estudos relacionados a busca por vida em outros planetas e todos os fatores que afetam a sobrevivência de organismos vivos (GALANTE *et al.*, pp. 315-339).

A principal forma de atenuar a radiação UV emitida pela estrela, seria se os planetas mantivessem sua atmosfera, o que depende de sua composição, permitindo assim que formas de vida proliferassem na superfície de algum dos três planetas na ZH (ESTRELA; PALIT; VALIO, 2020). Mas como ainda não se sabe a composição da atmosfera de nenhum dos planetas, foram utilizados cenários hipotéticos baseando-os em uma atmosfera primitiva e na atmosfera atual da Terra (WIT *et al.*, 2018). Foram estudadas duas bactérias para

testes com radiação UV (*D. radiodurans* e *E. coli*), que sobreviveram, mas em ambientes distintos (ESTRELA; PALIT; VALIO, 2020).

Existem diversos fatores relacionados à radiação que influenciam de maneira negativa o surgimento de vida, mas também podem se tornar importantes. Pois em uma intensidade reduzida, a energia das explosões poderia ser útil para que a química prebiótica surgisse no planeta. Acredita-se que a radiação é responsável pela criação das primeiras moléculas orgânicas necessárias para o funcionamento de formas de vida, possibilitando o surgimento de organismos vivos caso as emissões de radiação continuassem menos intensas (GALANTE *et al.*, pp. 95-113).

3.3. *Deinococcus radiodurans* e sua importância

A bactéria *D. radiodurans* é uma espécie de extremófilo oportunista, radio resistente, que é encontrada em ambientes artificiais com níveis extremos de radiação, como nos núcleos de reatores nucleares, por exemplo. A desidratação e a ação da radiação causam efeitos semelhantes ao DNA das bactérias (CAVICCHIOLI, 2002). A *D. radiodurans* vive naturalmente em ambientes desérticos, e é capaz de sobreviver nesses ambientes devido à capacidade de reparar seu DNA rapidamente, ou seja, consegue reparar seu DNA mais rápido do que a degradação deste (BATTISTA, 1997).

Essa bactéria é capaz de sobreviver também em condições extremas como altos níveis de substâncias químicas tóxicas, calor e dessecação. Ainda não se sabe exatamente quais características permitem que a bactéria resista a tais condições, mas já existem alguns estudos em relação à sua resistência a emissões de radiação UV (BATTISTA, 1997). Nesse caso seria algo relacionado à morfologia do DNA da bactéria, que é organizado em um único anel, o que impede que as partes do DNA que são quebradas pela radiação não fiquem totalmente livres no citoplasma (Figura 2). Qualquer parte cortada do DNA continua presa ao anel e eventualmente voltará à sua posição inicial: isso impede que o organismo perca informação genética (BENJAMIN; DIRK; 2006).

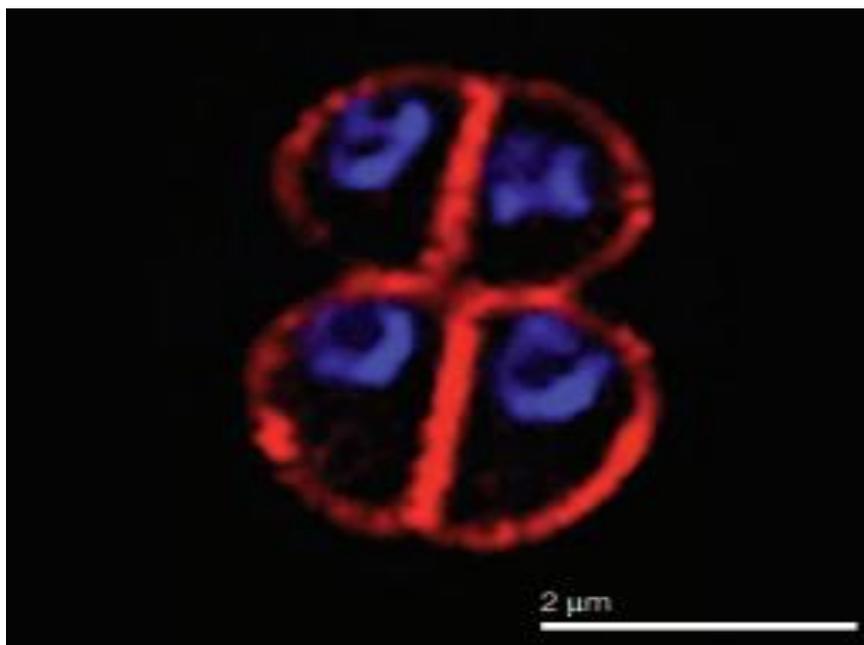


Figura 2: Imagem de *Deinococcus radiodurans* tratada, utilizando a técnica de epifluorescência, possibilitando a visualização do DNA destacado em azul, e a parede celular em vermelho. Fonte: COX et al. (2005)

A capacidade de extremófilos como a *D. radiodurans* de sobreviverem a altos níveis de radiação UV é de extremo interesse. São ótimos voluntários para habitarem outros planetas que não possuam uma proteção muito grande contra a radiação solar, como Marte (GALANTE *et al.*, pp. 155-171). Caso algum organismo seja encontrado, provavelmente estará em estado de hibernação, e se tratará de um extremófilo capaz de sobreviver a temperaturas muito baixas (FRIEDMANN; OCAMPO-FRIEDMANN, 1984a). Na Terra já foram encontradas diversas espécies em tais condições, e quando são colocadas em ambientes com características mais propícias, seu metabolismo volta a funcionar normalmente, trazendo a possibilidade de sobrevivência e proliferação da espécie (GALANTE *et al.*, pp. 155-171).

Em um estudo realizado utilizando bactérias das espécies *E. coli* e *D. radiodurans* para comparar a capacidade de sobrevivência desses microrganismos, a bactéria *D. radiodurans* apresentou uma taxa muito maior de viabilidade em relação a *E. coli*, apresentando uma porcentagem de sobreviventes maior quando expostas a diversas condições de estresse, como variação de temperatura e pressão, e a irradiação UV (DIAZ; SCHULZE-MAKUCH, 2006).

3.4. Características de Marte e sua importância para a Astrobiologia

A evolução da habitabilidade de Marte teve seu melhor período para o surgimento das primeiras formas de vida nos primeiros bilhões de anos do planeta, quando ainda existiam habitats aquáticos. Mas é possível que mesmo depois do desaparecimento desses habitats, antes do período hesperiano de Marte (3 bilhões de anos) terminar, microrganismos semelhantes aos que encontramos na Terra podem ter surgido (DAVILA; SCHULZE-MAKUCH, 2016).

Isso seria possível por conta das adaptações desses organismos, pois seriam semelhantes a algumas espécies de bactérias que possuem adaptações específicas para o ecossistema em que vivem, como a *Deinococcus-Thermus*. Essa bactéria é importante para esse estudo, pois é normalmente encontrada em ambientes desérticos, com pouca presença água, o que se assemelha muito com o que é visto em Marte (BATTISTUZZI; HEDGES, 2009).

Levando em consideração o que é visto em desertos do planeta Terra, existe a possibilidade de microrganismos serem encontrados abaixo de rochas (DAVILA; SCHULZE-MAKUCH, 2016). E é possível que sejam encontrados apenas fósseis desses organismos (Figura 3), pois no período hesperiano ainda existia a presença de gelo e neve na superfície do planeta Marte, antes da água evaporar. Isso poderia promover uma pequena vantagem para organismos mais resistentes, mas que ainda necessitavam da água para a sua sobrevivência (FRIEDMANN; OCAMPO-FRIEDMANN, 1984b).

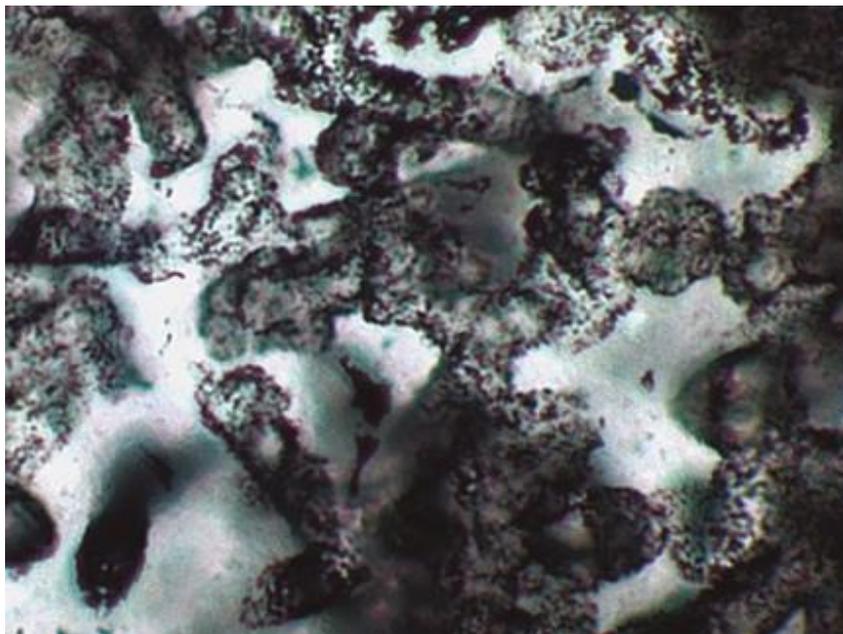


Figura 3: Um dos fósseis de bactérias mais antigo encontrado na Terra (cerca de 3,4 bilhões de anos atrás). Fonte: GALANTE *et al.*, pp. 35 (2016)

Existem alguns biomarcadores, como aminoácidos e outros compostos orgânicos que são ótimos biomarcadores na procura por vida em Marte, já que são essenciais para a existência de organismos vivos. Mas ao serem expostos a radiação ionizante e a espécies oxidantes na superfície de Marte, essas moléculas acabam sendo destruídas, e como a atmosfera do planeta é extremamente rarefeita, a única forma de encontrar essas moléculas seria procurando alguns metros abaixo da superfície do planeta, que já seria o suficiente para impedir o contato de aminoácidos com substâncias oxidativas e com a radiação (KMINEK; BADA, 2006).

De acordo com os experimentos feitos, espécies de cianobactérias colocadas abaixo de apenas 1 mm de rochas, ou algum tipo de solo, conseguiriam sobreviver e se proliferar. Mas isso só seria possível caso fossem encontrados indícios de água e nutrientes que são necessários para essa espécie. O que significa que mesmo que essas bactérias sejam resistentes a dessecação e a radiação ionizante, seriam mortas em contato com a radiação UV se estivessem em um estado de dessecação, pois não haveria água e nutrientes para sua sobrevivência (COCKELL, 2005).

Durante o período Amazônico de Marte, alguns eventos ocorreram, que podem ter influenciado para que a procura por vestígios de vida seja algo tão difícil. Um dos fatores principais foi a erosão da superfície marítima que se tornou lamacenta, o que pode ter causado o transporte de regiões onde havia colônias de microrganismos mais desenvolvidas, como os estromatólitos, para regiões inacessíveis atualmente (DAVILA; SCHULZE-MAKUCH, 2016).

A perda de água pode ter levado à extinção de cada vez mais espécies até um limite, no qual apenas espécies capazes de sobreviver à dessecação excessiva do planeta seriam capazes de sobreviver. Porém só poderiam ser encontradas abaixo de alguma proteção contra a radiação solar (DAVILA; SCHULZE-MAKUCH, 2016). Levando em consideração a escassez de elementos essenciais para a proliferação dos organismos, ainda é possível a existência de poucas espécies vivas, mas que não são capazes de se proliferar de forma efetiva (FRIEDMANN; DRUK; MCKAY, 1994).

Em algumas regiões ao Norte de Marte foram encontrados sais higroscópicos, e a deliquescência desses minerais pode prover um local com água líquida, que seria acessível a microrganismos. Sendo que minerais específicos irão prover condições distintas, o que dá espaço para apenas alguns microrganismos conseguirem realizar suas atividades metabólicas (DAVILA; SCHULZE-MAKUCH, 2010).

De acordo com novas descobertas realizadas pelo Trace Gas Orbiter (TGO), utilizando um instrumento chamado de Detector de Nêutrons Epitérmicos de Resolução Fina

(FRIEND, em inglês), que é um instrumento responsável por pela busca por nêutrons para mapear o conteúdo de hidrogênio na superfície de Marte (Figura 4), foram encontradas quantidades significativas de água na superfície do planeta, tendo em vista que 10 a 30% do material encontrado é constituído de água. Sabe-se que o gelo não é apenas um material importante na busca por organismos primitivos, assim como moléculas orgânicas complexas, mas também um recurso necessário para futuras missões a Marte, assim como sua colonização, uma ideia que se torna cada vez mais palpável (MITROFANOV, I. *et al.*, 2022).

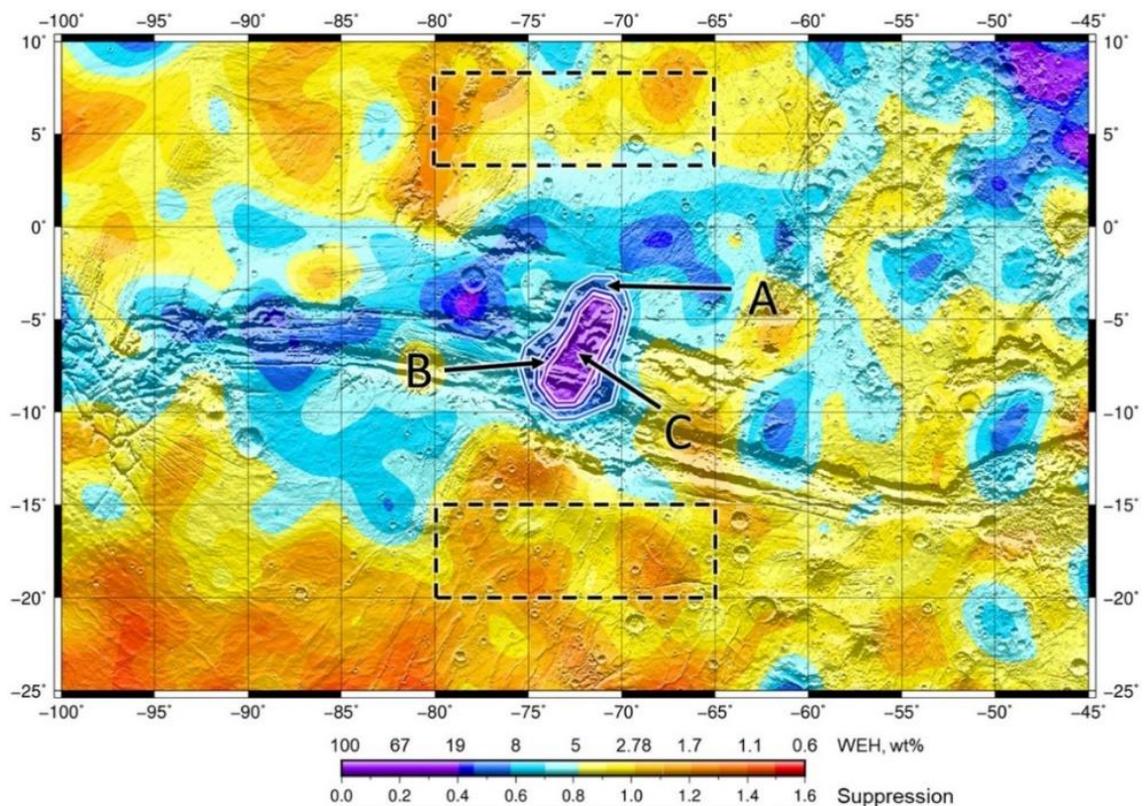


Figura 4: Mapa criado pelo telescópio FRENDA que apresenta a presença de grande abundância de hidrogênio, representado pelas áreas A, B e C, na região central do sistema Valles Marineris. Fonte: Mitrafanov, I. *et al.* (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Astrobiologia, assim como os extremófilos e a possibilidade da existência de formas de vida em outros planetas são temas que vêm trazendo interesse para a exploração espacial, assim como uma visão mais palpável da existência de vida. Ao invés de espécies extremamente avançadas, a realidade é que nossa maior chance de descobrir se estamos sozinhos é buscando por microrganismos. Mesmo sendo formas de vida mais simples, observamos uma resistência extremamente superior em relação a organismos mais

desenvolvidos, tendo como base características ambientais (temperatura, pressão, pH, emissão de radiação, dessecação etc.).

Atualmente, a melhor maneira de buscar por vida em outros planetas é estudando as características, assim como a viabilidade da existência de organismos vivos nos planetas que fazem parte do nosso Sistema Solar. Mesmo que já exista a tecnologia necessária para fornecer dados diversos sobre exoplanetas (planetas que pertencem a outros sistemas planetários), como composição atmosférica e do solo, precisamos de dados que sejam extraídos diretamente do planeta. Isso ocorre em Marte, utilizando rovers e drones que percorrem a superfície do planeta, coletando dados e buscando por fatores que possam indicar a existência de formas de vida, assim como alguns recursos necessários para uma possível colonização no futuro.

Sabe-se que Marte é de extrema importância para a Astrobiologia, não só pela sua distância, mas também pelo seu passado, que apresentava características semelhantes à Terra, em relação a composição atmosférica e a presença de água líquida em abundância da superfície do planeta. Ou seja, é possível que no passado, houvesse formas de vida em Marte, que realizavam atividades metabólicas e se proliferavam, e hoje talvez possamos encontrar fósseis desses supostos organismos ou até mesmo alguma espécie ainda viva, ou em estado de hibernação. É claro que são apenas possibilidades, mas quando estudamos os microrganismos extremófilos encontrados na Terra, isso se torna uma ideia palpável.

Extremófilos são um grupo de seres vivos, composto principalmente por microrganismos, que possuem características que dão a eles a resistência a características ambientais extremas. Com isso, podem ser encontrados locais que são considerados inóspitos para a maioria das formas de vida conhecidas, como em crateras vulcânicas com pH elevadíssimos, desertos com temperaturas extremamente elevadas, ou em ambientes árticos, onde são encontrados, em sua maioria, extremófilos em estado de hibernação há milhares de anos.

Dentre esses microrganismos, bactérias da espécie *D. radiodurans* possuem características que permitem a regeneração de seu DNA de forma extremamente acelerada, possibilitando que resistam à emissão de grandes quantidades de radiação, criando espaço para que esses microrganismos habitem naturalmente desertos, por exemplo, já que também possuem resistência a temperaturas elevadas e dessecação.

Em Marte, a quantidade de radiação UV que chega à superfície do planeta é muito elevada, devido à sua atmosfera extremamente rarefeita, deixando o planeta desprotegido. Isto resultou também na evaporação de praticamente toda a água líquida do planeta, por causa da baixa pressão. Sobraram apenas alguns locais específicos que apresentam,

periodicamente, condições adequadas para que a água se torne líquida, mas na maioria das vezes são encontrados apenas locais com reservas congeladas.

Sabe-se também que a superfície do planeta é composta, principalmente, de óxido de ferro e é extremamente arenoso, tornando-se um ambiente inóspito para os organismos sem resistência a radiação e a dessecação, já que não apresenta proteção contra radiação. Porém, existem extremófilos que apresentam tais resistências, como a *D. radiodurans*.

Para que esses microrganismos consigam se proliferar, é necessário que exista uma proteção mínima contra a radiação, como alguma cavidade alguns centímetros abaixo do solo, ou até mesmo uma rocha. Como visto em desertos da Terra, como no deserto de Negev, muitas vezes são encontradas colônias de bactérias na base das rochas, pois fornecem proteção contra a radiação UV, além de prover um local mais úmido.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sabemos que o questionamento sobre a existência de vida fora da Terra sempre esteve presente na história, mas com o conhecimento e tecnologia atuais, somos capazes de buscar vida nos lugares certos, tendo como base as condições ambientais necessárias para que um organismo vivo possa sobreviver. Além disso, hoje já é nítido que as espécies que temos mais chance de encontrar serão de microrganismos.

Marte é o planeta do Sistema Solar que apresenta maior possibilidade de que existam formas de vida em alguma região da sua superfície ou abaixo dela. Apesar de suas características inóspitas, como a atmosfera rarefeita que permite a passagem de radiação emitida pelo Sol, espécies oxidantes que destroem moléculas orgânicas, escassez de água e temperaturas extremamente baixas, continua sendo foco na Astrobiologia, mas deve-se lembrar que são buscados microrganismos, que mesmo possuindo características mais rudimentares, são capazes de sobreviver em ambientes que se assemelham a Marte, sendo assim, é o melhor planeta para buscar vida, levando em consideração sua distância da Terra e seu passado.

Com base nas pesquisas realizadas e no conteúdo adquirido a partir de textos científicos, conclui-se que por mais que seja um tema pouquíssimo discutido, principalmente no Brasil, os estudos relacionados à procura por formas de vida em outros planetas utilizando extremófilos, como a bactéria *D. radiodurans*, são de grande relevância.

Embora este trabalho tenha um cunho teórico, abre espaço para pesquisas futuras inclusive de âmbito prático. Testes e experimentos práticos podem ser elaborados para entender melhor as características destes organismos, principalmente a *D. radiodurans*, que é a espécie candidata ideal para sobreviver em Marte devido à sua resistência a grandes

emissões de radiação e à dessecação. Entre experimentos possíveis, sugere-se a introdução desses organismos em um instrumento chamado **câmara de microclima**, capaz de simular as condições climáticas e geológicas, como composição atmosférica e do solo, e emissão de radiação UV, facilitando a realização de pesquisas mais complexas envolvendo tarefas práticas. Um equipamento como este pode ser encontrado no Laboratório de Química Fundamental da USP, coordenado pelo professor Fabio Rodrigues.

REFERÊNCIAS

BATTISTA, John R. Against all odds: the survival strategies of *Deinococcus radiodurans*. **Annual Review of Microbiology**, v. 51, n. 1, p. 203-224, 1997.

BATTISTUZZI, Fabia U.; HEDGES, S. Blair. **A major clade of prokaryotes with ancient adaptations to life on land. Molecular Biology and Evolution**, v. 26, n. 2, p. 335-343, 2009.

BLUMBERG, Baruch S. The NASA Astrobiology Institute: early history and organization. **Astrobiology**, v. 3, n. 3, p. 463-470, 2003.

CAVICCHIOLI, Ricardo. Extremophiles and the search for extraterrestrial life. **Astrobiology**, v. 2, n. 3, p. 281-292, 2002.

COCKELL, Charles S. et al. Effects of a simulated martian UV flux on the cyanobacterium, *Chroococcidiopsis* sp. 029. **Astrobiology**, v. 5, n. 2, p. 127-140, 2005.

COX, Michael M.; BATTISTA, John R. *Deinococcus radiodurans*—the consummate survivor. **Nature Reviews Microbiology**, v. 3, n. 11, p. 882-892, 2005.

DAVILA, Alfonso F. et al. Hygroscopic salts and the potential for life on Mars. **Astrobiology**, v. 10, n. 6, p. 617-628, 2010.

DAVILA, Alfonso F.; SCHULZE-MAKUCH, Dirk. The last possible outposts for life on Mars. **Astrobiology**, v. 16, n. 2, p. 159-168, 2016.

DIAZ, B.; SCHULZE-MAKUCH, Dirk. Microbial Survival Rates of *Escherichia coli* and *Deinococcus radiodurans* Under Low Temperature, Low Pressure, and UV-Irradiation Conditions, and their Relevance to Possible Martian Life. **Astrobiology**, vol. 6, pp. 332-347, 2006

ESTRELA, Raissa; PALIT, Sourav; VALIO, Adriana. Surface and oceanic habitability of Trappist-1 planets under the impact of flares. **Astrobiology**, v. 20, n. 12, p. 1465-1475, 2020.

FRIEDMANN, E. I.; DRUK, A. Y.; MCKAY, C. P. Limits of life and microbial extinction in the Antarctic desert. **Antarctic Journal of the United States**, v. 29, p. 176-180, 1994.

FRIEDMANN, E. I.; OCAMPO-FRIEDMANN, R. Endolithic microorganisms in extreme dry environments: analysis of a lithobiontic microbial habitat. **Current Perspectives in Microbial Ecology**, p. 177-185, 1984a.

FRIEDMANN, E. I.; OCAMPO-FRIEDMANN, R. The Antarctic cryptoendolithic ecosystem: relevance to exobiology. **Origins of Life**, v. 14, n. 1, p. 771-776, 1984b.

GALANTE, Douglas; SILVA, E. P.; RODRIGUES, Fábio; HORVATH, Jorge; AVELLAR, M. G. B. *Astrobiologia: uma ciência emergente*, São Paulo, Tikinet Edição, IAG/USP, 2016. ISBN 978-85-66241-03-7

KMINEK, Gerhard; BADA, Jeffrey L. The effect of ionizing radiation on the preservation of amino acids on Mars. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 245, n. 1-2, p. 1-5, 2006.

MITROFANOV, I. *et al.* The evidence for unusually high hydrogen abundances in the central part of Valles Marineris on Mars. **Astrobiology**, [s. l.], v. 374, 1 mar. 2022.

WIT, J. *et al.* The nature of the TRAPPIST-1 exoplanets. **Astronomy & Astrophysics**, v. 613, p. A68, 2018.