

# Espectroscopia Raman: Uma revisão concisa a partir da Física Aplicada e seu uso em pesquisas de Astrobiologia

Raman Spectroscopy: A concise review from Applied Physics and its use in Astrobiology research

Bruno Leonardo do Nascimento-Dias<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Recebido em 29 de junho de 2025. Revisado em 07 de agosto de 2025. Aceito em 20 de agosto de 2025.

A ideia principal aqui é expor a importância da espectroscopia Raman para pesquisas em astrobiologia. Dito isso, o objetivo principal aqui será exibir e destacar como essa técnica passou a ser utilizada em missões espaciais por ser capaz de obter resultados de maneira não destrutiva. Do ponto de vista do ensino, a espectroscopia pode ser vista como um exemplo que abre caminho para ilustrar a interdisciplinaridade existente entre os conceitos de Física, Química, Matemática e Engenharia. Afinal, é por meio das relações que existem entre esses diferentes campos de conhecimento que instrumentos científicos baseados no efeito Raman são desenvolvidos para atividades de pesquisas. A metodologia utilizada para a elaboração desta revisão é constituída da concatenação de informações provenientes de fontes secundárias. Os resultados e as discussões abordam um breve contexto histórico da astrobiologia, bem como as primeiras aplicações da espectroscopia Raman; o protocolo e as vantagens do uso dessa técnica em missões espaciais para Marte voltadas às pesquisas em astrobiologia; a importância dos biomarcadores; e o processo de identificação por meio da espectroscopia Raman. Por fim, apresenta-se um panorama contextualizado das expectativas e do uso do equipamento de espectroscopia Raman desenvolvido para missões de exploração espacial em Marte. Como parte das considerações finais, são discutidos alguns argumentos favoráveis e desfavoráveis ao empenho e ao investimento de recursos em missões espaciais, bem como à aplicação da espectroscopia Raman na busca por vida em Marte.

**Palavras-chave:** Marte, Técnica analítica, Microbiologia, Extremófilos, Exploração espacial.

The main idea here is to highlight the importance of Raman spectroscopy for astrobiology research. That said, our main objective is to demonstrate how this technique came to be used in space missions because it can obtain results non-destructively. From a teaching perspective, spectroscopy can be seen as an example that paves the way for illustrating the interdisciplinarity that exists between the concepts of Physics, Chemistry, Mathematics, and Engineering. After all, it is through the relationships that exist between these different fields of knowledge that scientific instruments based on the Raman effect are developed for research activities. The methodology used to prepare this review consists of concatenating information from secondary sources. The results and discussions cover a brief historical context of astrobiology, as well as the first applications of Raman spectroscopy; the protocol and advantages of using this technique in space missions to Mars focused on astrobiology research; the importance of biomarkers; and the process of identification through Raman spectroscopy. Finally, we present a contextualized overview of the expectations and use of Raman spectroscopy equipment developed for space exploration missions to Mars. Concluding remarks discuss some arguments for and against the commitment and investment of resources in space missions, as well as the application of Raman spectroscopy in the search for life on Mars.

**Keywords:** Mars, Analytical technique, Microbiology, Extremophiles, Space exploration.

## 1. Introdução

A espectroscopia Raman é uma técnica utilizada dentro das atividades de pesquisa científicas para realizar análises de amostras líquidas ou sólidas [1]. Em outras palavras, é um método que permite obter informações sobre a composição química e mineralógica de diferentes tipos de materiais. Resumidamente, técnicas como essa contribuem, fornecendo dados baseados em princípios físicos e/ou químicos.

No caso específico da espectroscopia Raman, os dados são obtidos após a interação da radiação com a matéria. Esse processo gera um fenômeno de espalhamento, em que a frequência emitida pode ser maior ou menor que a da radiação incidente. Essa diferença de energias corresponde às transições vibracionais moleculares dos sólidos ou líquidos analisados. Vale a pena ressaltar que cada espectro é único, ou seja, não existem duas amostras diferentes com o mesmo espectro Raman. Assim, os espectros Raman podem ser considerados como “digitais” de cada amostra.

Atualmente, a espectroscopia Raman passou a ser utilizada em missões espaciais (e.g., ao planeta Marte). Inicialmente, um espectrômetro Raman foi acoplado ao

\*Endereço de correspondência: [bruno.astrobio@gmail.com](mailto:bruno.astrobio@gmail.com)  
Editor-Chefe: Marcello Ferreira

*Mars Science Laboratory* [2] – também conhecido como *Curiosity* –, com o objetivo de analisar a composição química das rochas marcianas na Cratera Gale, em busca de evidências que pudessem indicar que Marte, no passado, teria sido habitável. De modo similar, a *Perseverance* foi enviada recentemente à Cratera Jezero, também equipada com um espectrômetro Raman, mas agora com um objetivo adicional: buscar vestígios de compostos orgânicos – o que poderia sugerir a existência de vida no passado marciano.

As principais razões para o uso da espectroscopia Raman nessas missões espaciais devem-se, em primeiro lugar, ao fato de ser uma técnica analítica que fornece informações inequívocas por meio de seus espectros [2, 3]. Em segundo lugar, por ser considerada não destrutiva e de rápida obtenção de dados [4]. Neste contexto, “não destrutiva” refere-se à ausência de necessidade de preparo prévio da amostra, preservando sua integridade e estrutura morfológica antes e após a análise, o que permite a realização de outras técnicas complementares com a mesma amostra.

Assim, a motivação para esta revisão está relacionada ao crescente uso da espectroscopia Raman em missões espaciais voltadas à busca por vida extraterrestre – especialmente em Marte. Essas pesquisas fazem parte do campo da Astrobiologia, que, conforme Blumberg [5], busca elucidar a origem, a evolução e a distribuição da vida no Universo – um tema que não é explorado apenas pela mídia ou pela curiosidade do público leigo, mas também é amplamente discutido pela comunidade científica, com base em pesquisas rigorosas atualmente.

O principal objetivo deste trabalho é sintetizar informações para o ensino de Física aplicada, destacando os principais espectros Raman de materiais relevantes para a Astrobiologia – seja na busca por sinais de vida extraterrestre, seja na investigação de evidências de que Marte pode ter sido habitável no passado. Serão apresentadas as vantagens dessa técnica para a caracterização de biomarcadores marcianos, incluindo espectros de modos vibracionais de materiais biológicos (como proteínas, aminoácidos e bases de DNA ou RNA) e biogeológicos (como minerais formados por ação microbiana), que podem ser úteis para a Astrobiologia e potencialmente encontrados em Marte.

A metodologia desta investigação baseou-se em fontes secundárias, por meio de levantamento, triagem, agrupamento e compilação de dados. A intenção, com esse procedimento metodológico, foi reunir informações sobre os principais desafios da operação de um espectrômetro Raman em pesquisas de Astrobiologia durante missões espaciais a Marte. Primeiramente, será apresentado um panorama geral das pesquisas em Astrobiologia moderna, tanto *in situ* quanto *ex situ*. Em seguida, serão descritos os protocolos para a aplicação da espectroscopia Raman e a configuração de dados sobre a geologia da superfície marciana, destacando como essa técnica favorece a obtenção de informações relevantes para a Astrobiologia. Posteriormente, serão apresentados dados

de biomarcadores que podem ser cruciais para essas pesquisas. Por fim, serão explorados cenários de como a espectroscopia Raman pode ser utilizada na exploração espacial, em missões como a *ExoMars*.

## 2. Um Breve Resumo Histórico Sobre a Pesquisa em Astrobiologia

No início, toda a pesquisa em astrobiologia era considerada por muitos cientistas, como George Gaylord Simpson [6], como uma ciência que ainda não havia demonstrado a existência de seu objeto de estudo. Isso reverberou em objeções que classificavam “esse tipo de programa de pesquisa como uma perda de tempo e sem esperança”, nas palavras de Mayr, que ainda contestava, afirmando também que “precisávamos lidar com realidades, e não com sonhos”.

No entanto, de acordo com Noack [7], não há mais questionamentos sobre a credibilidade e a legitimidade social da astrobiologia como pesquisa científica. Um dos motivos para essa mudança foi a descoberta do primeiro exoplaneta orbitando uma estrela do tipo solar (chamada 51 Pegasi), por Michel Mayor e Didier Queloz em 1995 [8]. Esse resultado abriu caminho para a identificação de outros mundos que até então permaneciam ocultos aos olhos das pesquisas científicas. Atualmente, já foram descobertos mais de 5 mil exoplanetas [9], e esse número cresce continuamente. Todos esses ambientes planetários podem potencialmente abrigar vida extraterrestre.

Outro fator que contribuiu para o estabelecimento da credibilidade da astrobiologia está relacionado às pesquisas com microrganismos em ambientes extremos [10, 11]. Cabe destacar que o termo “extremo” refere-se a condições limítrofes, sejam superiores ou inferiores, de parâmetros como temperatura, pressão, salinidade, pH e radiação. Assim, um ambiente extremo é todo local que apresenta valores excessivamente altos ou baixos de pelo menos uma dessas variáveis. Esses ambientes também são considerados análogos terrestres, pois possuem ao menos uma característica semelhante às de ambientes espaciais. Um exemplo é o Vale da Lua, no deserto do Atacama (Chile), onde as temperaturas elevadas, aliadas à alta salinidade e pH extremo, tornam o local hostil para a maioria das formas de vida terrestre, caracterizando-o como um análogo marciano [11, 12].

Embora esses locais sejam inóspitos para seres humanos, certos microrganismos não apenas sobrevivem, mas alguns até dependem dessas condições para existir. Organismos que necessitam de ambientes extremos são chamados de extremófilos – termo derivado do latim *extremus* (“extremo”) e do grego *philia* (φιλία, “amor”) [12, 13]. Por outro lado, organismos que conseguem tolerar essas condições, mas não dependem delas (podendo viver em ambientes moderados), são denominados extremotolerantes. Vale ressaltar que

extremotolerantes também são classificados como extremófilos, pois são capazes de habitar ambientes extremos.

Graças a esses avanços – a descoberta de exoplanetas e os estudos em ambientes extremos –, a astrobiologia deixou de ser um campo baseado em especulações. Inclusive, devido a essas pesquisas com microrganismos e ambientes extremos, é possível dizer que as condições para a existência – atual ou passada – de vida extraterrestre não apenas tornaram-se plausíveis, mas tiveram seus horizontes de pesquisa ampliados. Atualmente, a astrobiologia investiga não apenas exoplanetas, mas também corpos celestes próximos, como Marte e as luas Titã, Europa e Encélado [3, 14].

Dentre os corpos celestes mais próximos da Terra com potencial para ter abrigado vida no passado, Marte destaca-se como o principal candidato. Primeiro, por sua proximidade, que permite o envio de sondas, *rovers* e *landers* equipados para análises da superfície. Segundo, por suas similaridades com a Terra: é um planeta rochoso cujas temperaturas no verão marciano podem atingir 20°C – isso proporciona condições favoráveis para a água existir em estado líquido. Além disso, evidências [15–17] sugerem a presença passada de água líquida em sua superfície – um forte indício de habitabilidade e possível existência de vida em seu passado. Por esses motivos, Marte tornou-se o principal alvo de pesquisas em astrobiologia. Dito isto, a análise científica no planeta vermelho pode ser realizada *ex situ*, por meio de meteoritos marcianos [18–20], ou *in situ*, com missões robóticas como *rovers*, *landers* e, mais recentemente, um *drone* [16].

Os meteoritos marcianos são fragmentos da superfície de Marte que chegaram à Terra após eventos de impacto [21]. Esses materiais são extremamente valiosos, pois, até o momento, são os únicos exemplares de rochas marcianas disponíveis para análise em laboratórios terrestres – embora a missão *Perseverance* busque mudar esse cenário [16]. Enquanto o retorno de amostras não se concretiza, os meteoritos permanecem como a única fonte direta de estudo, e a espectroscopia Raman surge como uma técnica poderosa nesse contexto [22], fornecendo dados precisos sobre a composição química e mineralógica desses materiais [23]. Como cada mineral possui um espectro Raman único – uma “impressão digital” –, a técnica permite identificação inequívoca.

Quanto às pesquisas *in situ* realizadas por meio de “laboratórios enviados a Marte” [23], a espectroscopia Raman tem ganhado destaque crescente, primeiro com o *Curiosity* e agora com o *Perseverance*. Essa protagonismo deve-se a diversos fatores, como:

1. A possibilidade que a espectroscopia Raman oferece de entender a história evolutiva de um planeta a partir da análise geoquímica de ambientes como Marte [22, 24–26].
2. Por ser uma técnica analítica capaz de identificar tanto compostos orgânicos quanto inorgânicos de maneira não destrutiva, a espectroscopia Raman

apresenta um fator que favorece seu uso colaborativo com outras técnicas. Além disso, a concatenação dessas técnicas e os seus resultados podem contribuir com informações relevantes na busca por vestígios de material biológico marciano de modo ainda mais acurado [4, 20, 27, 28].

3. O uso da técnica de Raman é capaz de detectar e fornecer informações mineralógicas das rochas, sendo possível fazer a identificação das principais fases minerais (ou seja, aquelas que compõem pelo menos 90% do material em solos e rochas). Além disso, o fator geoquímico gerados a partir de resultados da espectroscopia Raman ajudam a definir os processos petrogenéticos e a classificação das rochas (ígneas, sedimentares e metamórficas) [24, 26, 29, 30].
4. Contribui com análise do teor de voláteis, inclusões gasosas ( $H_2O$ ,  $SO_3$ ,  $CO_2$ ,  $NO_2$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ ) e determinação do estado de oxidação de elementos planetários, por exemplo, solo, superfícies rochosas e interior de rochas [29, 31].
5. Identificação de água e gelo em Marte, além de estado da matéria carbonácea e cristais hidratados [18, 19, 22, 24, 26, 29, 30, 32]

Assim, com o investimento adequado em equipamentos espectroscópicos Raman, é possível esperar um progresso científico considerável proporcionado por essa técnica analítica. Afinal, a espectroscopia Raman apresenta inúmeras propriedades favoráveis para pesquisas em Astrobiologia no planeta Marte. O avanço no desenvolvimento de instrumentos baseados em técnicas de espectroscopias vibracionais, como a Raman, representa um método poderoso para coletar informações sobre a mineralogia e a possível presença de compostos orgânicos em investigações voltadas à busca por vida extraterrestre em Marte. Vale a pena dizer ainda que essa tecnologia não se restringe ao planeta Marte – ela também pode ser útil e aplicada em futuras missões espaciais destinadas a analisar compostos químicos na lua Encélado ou a avaliar a presença de hidrocarbonetos na lua Titã.

### 3. Protocolo e as Vantagens da Espectroscopia Raman

Protocolo é um conjunto de regras adotadas por convenção, que define e estabelece como uma determinada tarefa deve ser desenvolvida. Em outras palavras, trata-se de um guia com informações para a execução correta de procedimentos em uma atividade. No caso específico do protocolo para análise de espectros Raman na identificação de compostos químicos e mineralógicos, geralmente são necessárias duas ou mais bandas [2, 20, 24–26, 33].

É importante dizer que existem exceções em que uma única banda muito intensa pode ser suficiente para a identificação. Alguns casos particulares, como os carbonatos de cálcio, possuem uma banda forte característica entre  $1082\text{ cm}^{-1}$  e  $1090\text{ cm}^{-1}$  [18, 24–26, 33]. No entanto,

mesmo nesses casos, embora seja possível identificar o grupo mineral, uma única banda não é suficiente para especificar se o mineral detectado é calcita, aragonita ou dolomita. Em suma, a banda mais intensa ajuda apenas a distinguir os grupos de minerais presentes na amostra, mas não suas variações específicas.

Para identificar com precisão o mineral específico, é necessário avaliar os modos vibracionais de rede e de flexão. Retomando o exemplo dos carbonatos de cálcio, tanto a calcita quanto a aragonita apresentam a mesma banda intensa em  $1086\text{ cm}^{-1}$ , mas seus modos de rede diferem: a calcita possui uma banda característica em  $281\text{ cm}^{-1}$ , enquanto a aragonita apresenta uma em  $205\text{ cm}^{-1}$ . Além disso, os modos de flexão também auxiliam na diferenciação. Por exemplo, a aragonita tem um modo de flexão em  $703\text{ cm}^{-1}$ , enquanto outros carbonatos de cálcio contendo Fe ou Mg exibem bandas em  $712\text{ cm}^{-1}$ .

Os protocolos para uso da espectroscopia Raman em missões espaciais a Marte, conforme Daniel e Edwards [26], são desenvolvidos com base em instrumentação laboratorial e em materiais terrestres de ambientes análogos ao planeta [12, 34] (e.g., rochas e minerais potencialmente presentes lá). Esses equipamentos são testados em placas de ensaio especialmente projetadas, que simulam o protótipo acoplado à *Perseverance* [34]. O protocolo analítico para caracterização de amostras em Marte envolve três etapas principais:

1. Registro do espectro coletado;
2. Comparação com dados de amostras terrestres (e.g., rochas ígneas, sedimentares ou metamórficas e minerais conhecidos);
3. Identificação e catalogação em um banco de dados de compostos detectados em Marte.

Em casos em que não há correspondência com amostras terrestres conhecidas, os compostos químicos do espectro são avaliados e técnicas complementares são empregadas (e.g., difração de raios X para rochas e minerais) [3, 4]. Esses procedimentos são rigorosos, pois a identificação precisa da geologia marciana é crucial para pesquisas em astrobiologia – tanto na busca por ambientes habitáveis no passado quanto, potencialmente, por sinais de vida existentes. Dito isso, a identificação de geologias com condições adequadas para sustentar sistemas bioquímicos em Marte – que podem ser favoráveis para a vida existir ou ter existido – tornou-se um pré-requisito para o desenvolvimento de equipamentos em missões espaciais [22–26, 29, 33].

Como mencionado anteriormente, a análise de rochas marcianas por Raman requer pouco ou nenhum pré-tratamento da amostra (e.g., corte, extração ou preparação especial). Essa característica é essencial para preservar vestígios de matéria orgânica que poderiam ser perdidos em técnicas que exigem preparação. Assim, a espectroscopia Raman evita a degradação de compostos sensíveis, aumentando a chance de detectar bioassinaturas – mesmo as mais frágeis – que possam indicar vida

passada em Marte. Em resumo, a espectroscopia Raman é vantajosa para análises em módulos remotos (como o *Curiosity* e a *Perseverance*) devido à sua capacidade de fornecer dados precisos com processamento mínimo, preservando a integridade das amostras e maximizando a detecção de informações relevantes para a astrobiologia.

#### 4. A Importância de Biomarcadores Para Astrobiologia e suas Identificações Através da Espectroscopia Raman

O termo “marcador” será conceituado aqui como a condição de delimitar, especificar, destacar e identificar uma ou mais características de um elemento de interesse. Na astrobiologia em particular, elementos tais como os hidrocarbonetos, bases nitrogenadas, carbonatos, sulfatos, fosfatos, além de água e possíveis sais dissolvidos, são de interesse e podem ser associadas aos chamados (bio)marcadores [26, 29, 35].

Um ponto importante que precisa ser exposto aqui é: toda matéria orgânica viva que conhecemos na Terra é expressa e delimitada por características específicas, sendo sua estrutura composta principalmente por carbono. A identificação do arranjo de átomos de carbono, então, ganha especial relevância quando esses átomos formam compostos complexos, como ácidos graxos, lipídios, proteínas, açúcares, carboidratos, aminoácidos ou bases estruturais do RNA e DNA.

A capacidade de identificar um conjunto de biomarcadores moleculares é crucial para as pesquisas em astrobiologia. A detecção desses compostos indicaria fortes indícios de que organismos vivos poderiam ter existido, por exemplo, em Marte. No caso improvável, porém possível, de detecção de RNA ou DNA, isso constituiria evidência direta da existência passada de vida no planeta vermelho.

Com o objetivo de obter informações relevantes para pesquisas astrobiológicas em Marte, foram realizadas ao longo dos anos análises da estrutura química de extremófilos que habitam ambientes terrestres análogos aos marcianos [12, 36]. A espectroscopia Raman tem se mostrado uma técnica capaz de fornecer dados precisos sobre biomarcadores [18, 27, 29, 31], essenciais para a construção de um banco de dados confiável que será utilizado tanto pela *Perseverance* quanto por futuras missões espaciais na busca por sinais de vida em Marte. É importante ressaltar que essas missões buscam especificamente sinais de vida microbiana ou vestígios fósseis marcianos, e não organismos multicelulares ou macrorganismos.

Diante desse contexto apresentado, os espectros Raman dos principais biomarcadores relevantes para Marte são encontrados na faixa de número de onda:

- (1)  $3200\text{--}3450\text{ cm}^{-1}$  contendo os modos de estiramento de OH e NH;

- (2) 2800–3150  $\text{cm}^{-1}$ , contendo os modos característicos CH modos de alongamento de compostos orgânicos aromáticos e alifáticos;
- (3) 1500–1650  $\text{cm}^{-1}$ , contendo os modos característicos de estiramento C=C de aromáticos, alcenos e carotenóides;
- (4) 1300–1400  $\text{cm}^{-1}$ , contendo os modos característicos de flexão de  $\text{CH}_2$  e  $\text{NH}$ ;
- (5) 1050–1200  $\text{cm}^{-1}$ , contendo os modos característicos de alongamento C–C.

Essas assinaturas são encontradas em ambientes extremos considerados análogos terrestres de Marte [36, 37] e são importantes para desvendar os mistérios do planeta vermelho [3, 11, 15, 17]. Embora essa pesquisa seja estimulante e instigadora, não constitui o foco principal deste trabalho. Um dos motivos é que alguns ingredientes orgânicos já foram identificados em rochas espaciais, mais especificamente em meteoritos carbonáceos.

Algumas rochas carbonáceas extraterrestres, como o meteorito Murchison, apresentam em sua estrutura compostos como aminoácidos, hidrocarbonetos poliaromáticos, aldeídos, cetonas, açúcares e até bases de RNA. Além disso, a literatura registra a detecção de compostos carbonosos em meteoritos marcianos como o ALH 84001 [36, 38] e o Zagami [27, 31], analisados por técnicas vibracionais como Raman e FTIR.

Portanto, os biomarcadores são uma realidade científica consolidada, demonstrando a crescente importância da espectroscopia Raman para pesquisas em Astrobiologia e missões espaciais. É fundamental destacar que, além da busca por sinais de vida microbiana em Marte, há também a investigação de informações sobre a “geologia adequada” – ou seja, condições que sugerem que Marte pode ter abrigado vida no passado (condições habitáveis).

Em termos práticos, essa busca concentra-se em regiões rochosas sedimentares e grupos de minerais hidratados, minerais carbonatados e qualquer grupo de mineral que seja formado com base na reação química em que um dos reagentes seja a água. Os principais grupos de minerais que foram identificados, até este momento, na superfície marciana são:

- (1) os carbonatos (calcita e magnesita), tem uma banda característica intensa e forte de alongamento C–O para calcita e aragonita em 1086  $\text{cm}^{-1}$ , para dolomita  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  ocorre em 1094  $\text{cm}^{-1}$  e para magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ), ocorre em 1115  $\text{cm}^{-1}$ ;
- (2) os sulfatos (jarosita, gesso) possuem bandas características fortes encontradas na faixa de 950–1030  $\text{cm}^{-1}$ ;
- (3) os silicatos (olivina, piroxênios, quartzo) possuem duas bandas características fortes para olivina 808–825  $\text{cm}^{-1}$  e entre 835–857  $\text{cm}^{-1}$ , as bandas características dos piroxênios ocorrem 1010–1018  $\text{cm}^{-1}$  e entre 656–660  $\text{cm}^{-1}$ , para o quartzo a banda característica forte ocorrem em 464  $\text{cm}^{-1}$ .
- (4) os óxidos (hematita, magnetita, ilmenita e goethita), possuem três bandas características fortes para hematita 411  $\text{cm}^{-1}$ , 292  $\text{cm}^{-1}$  e 226  $\text{cm}^{-1}$ , as bandas características para magnetita ocorrem 670  $\text{cm}^{-1}$  e entre 555  $\text{cm}^{-1}$ , para o ilmenita as bandas características ocorrem em 799  $\text{cm}^{-1}$  e 411  $\text{cm}^{-1}$ , três bandas características fortes aparecem para goethita em 387  $\text{cm}^{-1}$ , 299  $\text{cm}^{-1}$  e 241  $\text{cm}^{-1}$ .

É importante lembrar que, apesar de alguns minerais supracitados serem caracterizados por uma única banda, essa não é a regra geral. O diagnóstico molecular é alcançado de forma acurada por meio do protocolo que utiliza duas ou mais bandas Raman. Portanto, para que uma identificação seja considerada adequada, é necessária a seleção de várias faixas de número de onda, a fim de caracterizar corretamente as entidades moleculares e grupos funcionais [37, 39].

Este é o protocolo estabelecido para pesquisas utilizando espectroscopia Raman, pois os minerais podem apresentar variações em seus parâmetros de modo de rede. O ambiente, através de variações de pressão ou temperatura, pode gerar efeitos sobre o campo cristalino, deslocando significativamente os números de onda. Esses fatores podem levar a equívocos por parte de usuários iniciantes ou com pouca experiência em espectroscopia Raman. Assim, para os praticantes menos experientes, é fundamental atentar para:

1. Fatores instrumentais (como a resolução espectral e o comprimento de onda do laser);
2. A presença de diferentes componentes em uma mistura;
3. As concentrações relativas desses componentes.

Estes elementos podem contribuir para o deslocamento das bandas e alterar a aparência da resposta espectral obtida.

## 5. A Espectroscopia Raman em Missões de Exploração Espacial em Marte

Exploração é um termo associado tanto ao ato de investigação quanto ao de extração. Ambos possuem significados diferentes, isso é verdade, mas, na ciência, a exploração espacial pode ser considerada um ato de investigação que busca extrair informações sobre o observável. A curiosidade que leva a criança a querer conhecer o mundo observável é a mesma que move, provoca e desperta, no cientista, a vontade de resolver problemas científicos e buscar soluções para seus “quebra-cabeças”.

A exploração espacial em Marte se assemelha – guardadas as devidas proporções – às grandes navegações, que buscavam desbravar os mares utilizando instrumentos como a bússola e o céu estrelado para obter informações sobre a melhor trajetória para chegar aos novos mundos e, então, desvendar os mistérios que neles

existiam. As missões de pesquisa em astrobiologia para Marte têm como objetivo explorar um mundo desconhecido, igualmente repleto de mistérios. Porém, as nossas grandes navegações já não são mais à vela; atualmente, são robóticas – como demonstram as missões Spirit, Opportunity, Curiosity e Perseverance.

Além disso, nossa “bússola” para encontrar o que desejamos nessas expedições é a espectroscopia Raman, que se mostrou útil em uma missão de exploração planetária recente, realizada com o rover Curiosity. Demonstrou seu valor por não requerer manipulação da amostra e por permitir a análise tanto de materiais macroscópicos quanto microscópicos. Trata-se de uma técnica de grande confiabilidade comprovada por bancos de dados robustos e abertos sobre: (1) mineralogia (por exemplo, os bancos de dados <http://rruff.info/> ou <http://www.wurm.info/>), (2) composto orgânico (como o banco de dados espectral SDBS: <http://riodb01.ibase.aist.go.jp/sdbs/>), entre outros que não serão mencionados aqui, pois não é este o foco deste artigo. Todavia, vale a pena destacar que todos esses dados são *Open Access*, ou seja, possibilita realizar análises comparativas entre os espectros coletados e diversas referências por se tratar de um acesso aberto e gratuito para qualquer pessoa. Isso é fundamental para garantir o *ethos* da ciência (comunalismo, universalismo, ceticismo organizado e a imparcialidade).

É importante destacar que, por ser uma técnica não destrutiva, a espectroscopia Raman pode ser considerada nossa bússola na busca por indícios de condições geológicas favoráveis à existência de vida microbiana. Trata-se de uma excelente ferramenta para análises preliminares em avaliações biogeoquímicas, pois não exige o preparo da amostra a ser analisada. Isso proporciona uma baixa perda de informações, que podem ser avaliadas de forma complementar, seja do ponto de vista mineralógico, por meio de instrumentos de difração de raios X (XRD), seja a partir da composição química, por espectrômetros infravermelhos ou cromatógrafos.

A título de curiosidade, os ambientes terrestres considerados análogos a Marte são fundamentais também para a realização de testes, tanto dos sistemas de movimentação quanto dos equipamentos científicos, como o espectrômetro Raman. A missão Perseverance, assim como a Curiosity, passou por avaliações com sistemas Raman portáteis, testados em lugares como o deserto do Atacama e na Arctic Mars Analogue Svalbard Expedition (AMASE), nas ilhas Svalbard (Noruega) [40]. O objetivo era desenvolver ciência e engenharia que possibilitasse condições adequadas para a busca por vida em Marte, utilizando equipamentos Raman adaptados à missão.

Segundo Amundsen [40], a equipe da missão ExoMars Raman escolheu, para o instrumento de espectroscopia, um laser de excitação contínua na faixa verde, com comprimento de onda de 532 nm, bombeado por diodo, com um ponto de laser de 50  $\mu\text{m}$  no alvo. O espectrômetro, equipado com uma grade holográfica e um CCD, cobre

a faixa espectral de 150 a 3800  $\text{cm}^{-1}$ , capturando os modos Raman de silicatos, sulfatos, carbonatos, minerais hidróxidos, grupos funcionais de moléculas orgânicas e vibrações O-H em água, minerais hidratados e hidratos. A resolução espectral é de aproximadamente 6  $\text{cm}^{-1}$  abaixo de 2000  $\text{cm}^{-1}$ . A cabeça óptica é baseada em um colimador esférico, usado tanto para a excitação do laser quanto para a coleta do sinal Raman, com faixa de foco de  $\pm 1$  mm. O rover deve posicionar o alvo diante da cabeça óptica automaticamente ou sob instruções do centro de controle na Terra.

## 6. Conclusão

A pesquisa em astrobiologia, apesar de ainda ser considerada uma atividade científica em sua adolescência, possui o respeito e o reconhecimento de parte da comunidade científica como uma boa prática científica. No entanto, ainda existem críticos céticos em relação à busca por vida fora da Terra, desenvolvida como parte da pesquisa em astrobiologia. As palavras de George Gaylord Simpson, ao se referir a esse tipo de investigação como sendo “uma aposta com as probabilidades mais adversas da história” [41], reverberam e integram a essência de grande parte das contestações atuais ao desenvolvimento dessa área.

Ainda assim, há argumentos fortes a favor dessa linha de pesquisa, como as palavras de Carl Sagan [42]: “não saberemos se existem sinais até que os procuremos seriamente”. Ou, como afirmou o astrofísico Thomas R. McDonough [43]: “tirar a conclusão apressada de que eles não estão lá simplesmente porque nós não os vemos facilmente é recair no mesmo erro cometido pelas pessoas a respeito da vida microscópica ... O mundo estava apinhado de animais microscópicos, mas, como ninguém os via, eles não existiam.” Enviar missões de pesquisa em astrobiologia para Marte talvez não seja algo tão diferente de outras atividades científicas desenvolvidas ao longo dos anos (e.g., matéria escura e energia escura). Na realidade, o progresso da ciência tem demonstrado nossa capacidade de romper paradigmas, concebendo resultados que favorecem a geração de revoluções científicas [44].

Assim, o uso de técnicas analíticas, como a espectroscopia Raman, pode ser extremamente útil para produzir esses resultados “inesperados” e quebrar paradigmas – ao menos para os céticos e críticos ao desenvolvimento de pesquisas voltadas à astrobiologia. É importante destacar que, mesmo um “fracasso” pode ser considerado um sucesso – entendendo-se “fracasso” como uma frustração de expectativas quanto à descoberta de vestígios ou sinais de sistemas bioquímicos em Marte.

Por um lado, caso não sejam encontrados sinais de vida no planeta, a Terra será ainda mais valorizada como o único astro, entre os mais próximos dentro do Sistema Solar, a abrigar vida – o que promoveria uma nova perspectiva, reconhecendo-nos como algo singular

no contexto do Sistema Solar. Consequentemente, isso poderia gerar uma necessidade maior de preservação, tanto da vida quanto do nosso planeta.

Por outro lado, a descoberta de microrganismos em Marte possibilitaria uma compreensão mais ampla dos fatores que estabelecem condições para sustentar organismos vivos no Universo. Tal descoberta não apenas expandiria os horizontes da biologia terrestre, ao evidenciar que a vida pode emergir em condições radicalmente distintas daquelas da Terra. Nesse contexto, a astrobiologia deixa de ser mera busca empírica por formas de vida extraterrestre para tornar-se um campo que problematiza a própria definição de vida, sua singularidade e sua eventual universalidade, remetendo às reflexões ontológicas sobre o que significa “estar vivo” em um cosmos talvez indiferente à seres vivos como a conhecemos.

Por fim, cabe destacar que a espectroscopia Raman é uma técnica analítica capaz de obter resultados rápidos, que não requer preparo da amostra e pode ser utilizada para analisar tanto estruturas macroscópicas, como rochas, quanto microscópicas, como compostos químicos. Como principal atributo, destaca-se seu caráter não destrutivo, que permite análises complementares de uma mesma amostra. Assim, é possível concluir que um espectrômetro Raman constitui uma carga útil valiosa para qualquer missão espacial voltada à busca por informações químicas e mineralógicas. Em outras palavras, a técnica analítica de Raman é uma ferramenta poderosa para a astrobiologia e as ciências planetárias, devido às suas características favoráveis na obtenção de informações geoquímicas.

## Disponibilidade de Dados

Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo foi publicado no próprio artigo.

## Referências

- [1] A. Culka, F. Košek, A. Oren, L. Mana e J. Jehlička, *FEMS Microbiology Letters* **366**, 239 (2019).
- [2] A. Wang, J. Wei e R.L. Korotev, *Journal of Raman Spectroscopy* **51**, 1636 (2020).
- [3] E. Shi, A. Wang e Z. Ling, *MIR, Journal of Raman Spectroscopy* **51**, 1589 (2020).
- [4] B.L. Nascimento-Dias, D.F. Oliveira, A.S. Machado, O.M. Araújo, R.T. Lopes e M.J. Anjos, *X-Ray Spectrometry* **47**, 86 (2018).
- [5] B.S. Blumberg, *Astrobiology* **3**, 463 (2003).
- [6] G.G. Simpson, *Science* **143**, 769 (1964).
- [7] L. Noack, C. Verseux, P. Serrano, M. Musilova, P. Nauny, P. Nauny, T. Samuels, P. Schwendner, E. Simoncini e A. Stevens, *International Journal of Astrobiology* **14**, 533 (2015).
- [8] M. Mayor e D.A. Queloz, *Nature* **378**, 355 (1995).
- [9] J.L. Christiansen, *Nature Astronomy* **6**, 516 (2022).
- [10] G.N. Gupta, S. Srivastava, S.K. Khare e V. Prakash, *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology* **7**, 371 (2014).
- [11] B.L. Nascimento-Dias e J. Martinez-Frias, *International Journal of Astrobiology* **22**, 67 (2022).
- [12] L.J. Preston e L.R. Dartnell, *International Journal of Astrobiology* **13**, 81 (2014).
- [13] L.J. Rothschild e R.L. Mancinelli, *Nature* **409**, 1092 (2001).
- [14] J.L. Lambert, A. Wang, T. Vu, N. Tallarida, P. Edwards, S. Monacos e M. McHugh, *Adapting the Compact Integrated Raman Spectrometer (CIRS) for the Europa Lander Mission Concept*. Disponível em: <https://techport.nasa.gov/projects/96496>.
- [15] N.O. Renno, E. Fischer, G. Martínez e J. Hanley, *Life* **11**, 847 (2021).
- [16] J. Balaram, M. Aung e M.P. Golombek, *Space Science Reviews* **217**, 56 (2021).
- [17] F.J. Martín-Torres, M.P. Zorzano, P. Valentín-Serrano, A.M. Harri, M. Genzer, O. Kempainen, E.G. Rivera-Valentin, I. Jun, J. Wray, M.B. Madsen et al., *Nature Geosci* **8**, 357 (2015).
- [18] B.L. Nascimento-Dias, *International Journal of Astrobiology* **18**, 151 (2019).
- [19] B.L. Nascimento-Dias, M.B.B. Andrade, Z.M.C. Ludwig, *International Journal of Astrobiology* **18**, 547 (2019).
- [20] B.L. Nascimento-Dias, O.M.O. Araujo, A.S. Machado, D.F. Oliveira, M.J. Anjos, R.T. Lopes e J.T. Assis, *Applied Radiation and Isotopes* **152**, 156 (2019).
- [21] B.L. Nascimento-Dias, *Geosciences, Geociências* **40**, 771 (2021).
- [22] N. Tarcea, T. Frosch, P. Rösch, M. Hilchenbach, T. Stuffer, S. Hofer, H. Thiele, R. Hochleitner e J. Popp, em: *Strategies of Life Detection*, editado por O. Botta, J.L. Bada, J. Gomez-Elvira, E. Javaux, F. Selsis e R. Summons (Springer, Nova Iorque, 2008).
- [23] F. Rull, S. Maurice, I. Hutchinson, A. Moral, C. Perez, C. Diaz, M. Colombo, T. Belenguer, G. Lopez-Reyes, A. Sansano et al., *Astrobiology* **17**, 627 (2017).
- [24] N. Tarcea, M. Harz, P. Rösch, T. Frosch, M. Schmitt, H. Thiele e J. Popp, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* **68**, 1029 (2007).
- [25] A. Ellery, D. Wynn-Williams, J. Parnell, H.G.M. Edwards e D. Dickensheets, *Journal of Raman Spectroscopy* **35**, 441 (2004).
- [26] I. Daniel e H.G.M. Edwards, em: *Raman spectroscopy applied to Earth sciences and cultural heritage*, editado por J. Dubessy, M.C. Caumon e F. Rull (Mineralogical Union Publications, Chantilly, 2012).
- [27] B.L. Nascimento-Dias, M.E. Zucolotto, H.C. Belgo, T.V.F. Silva e V.D.C. Anjos, *International Journal of Astrobiology* **19**, 438 (2020).
- [28] W.G. Kong, A. Wang, J.J. Freeman e P. Sobron, *Journal of Raman Spectroscopy* **42**, 1120 (2011).
- [29] D. Carrizo, V. Muñoz-Iglesias, M.T. Fernández-Sampedro, C. Gil-Lozano, L. Sánchez-García, O. Prieto-Ballesteros e F. Rull, *Astrobiology* **20**, 405 (2020).
- [30] S. Martinez-Ramirez, S. Sanchez-Cortes, J.V. Garcia-Ramos, C. Domingo, C. Fortes e M.T. Blanco-Varela, *Cement and Concrete Research* **33**, 2063 (2003).

- [31] E. Palomba, A. Rotundi e L. Colangeli, *Icarus* **182**, 68 (2006).
- [32] R.L. Frost, M.L. Weier, K.L. Erickson, O. Carmody e S.J. Mills, *Journal of Raman Spectroscopy* **35**, 1047 (2004).
- [33] R. Hochleitner, N. Tarcea, G. Simon, W. Kiefer e J. Popp, *Journal of Raman Spectroscopy*, **35**, 515 (2004).
- [34] K. Uckert, R. Bhartia, L.W. Beegle, B. Monacelli, S.A. Asher, A.S. Burton, S.V. Bykov, K. Davis, M.D. Fries et al., *Applied Spectroscopy* **75**, 763 (2021).
- [35] Y. Oba, Y. Takano, Y. Furukawa, T. Koga, D.P. Glavin, J.P. Dworkin e H. Naraoka, *Nature Communications* **13**, 1 (2022).
- [36] A. Steele, M.D. Fries, H.E.F. Amundsen, B.O. Mysen, M.L. Fogel, M. Schweizer e N.Z. Boctor, *Meteoritics & Planetary Science* **42**, 1549 (2007).
- [37] D.D. Wynn-Williams e H.G.M. Edwards, *Planetary and Space Science* **48**, 1065 (2000).
- [38] T.F. Cooney, E.R. Scott, A.N. Krot, S.K. Sharma e A. Yamaguchi, *American Mineralogist* **84**, 1569 (1999).
- [39] H.G.M. Edwards, em: *Handbook of Vibrational Spectroscopy*, editores J.M. Chalmers e P.R. Griffiths (John Wiley & Sons, Chichester, 2006).
- [40] H.E.F. Amundsen, F. Westall, A. Steele, J. Vago, N. Schmitz, A. Bauer, C. Cousins, F. Rull, A. Sansano, I. Midtkandal e AMASE Team, *AMASE Team, I. Integrated ExoMars PanCam, Raman, and close-up imaging field tests on AMASE 2009*, EGU General Assembly (Viena, 2010). Disponível em: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2010/EGU2010-8757.pdf>.
- [41] S.J. Garber, *Journal of the British Interplanetary Society* **2**, 3 (1999).
- [42] C. Sagan, *O mundo assombrado pelos demônios: A ciência vista como uma vela no escuro* (Companhia das Letras, São Paulo, 2006).
- [43] T.R. Mcdonough, *The search for extraterrestrial intelligence: listening for life in the cosmos* (Wiley, Nova Iorque, 1987).
- [44] T.S. Kuhn, *The structure of scientific revolutions* (University of Chicago Press, Chicago, 2012).