

**TERRAFORMAÇÃO EM ESCALA REDUZIDA: CULTIVO CONSORCIADO E
INTRODUÇÃO DE EXTREMÓFILOS EM SOLO ANÁLOGO AO MARCIANO**

**REDUCED-SCALE TERRAFORMING: INTERCROPPING AND INTRODUCTION OF
EXTREMOPHILES IN SOIL ANALOGOUS TO MARTIAN SOIL**

**TERRAFORMACIÓN A ESCALA REDUCIDA: CULTIVOS INTERCAMBIADOS E
INTRODUCCIÓN DE EXTREMÓFILOS EN SUELOS ANÁLOGOS A LOS SUELOS
MARCIANOS**



10.56238/revgeov17n3-195

Arthur Marques da Silva

Graduando em Medicina

Instituição: Universidade de São Paulo (USP)

E-mail: 10arthurmarques@gmail.com

Luiz Claudio Gomes da Silva e Silva

Graduando em ciência da computação

Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

E-mail: luizgsilvasilva@gmail.com

Paulo Vieira de Figueiredo Marques

Graduando em Engenharia Química

Instituição: Instituto Federal do Rio de Janeiro (IFRJ)

E-mail: paulovmarques0903@gmail.com

Gabriel Aurilio da Silva

Graduando em Direito

Instituição: Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO)

E-mail: gabrielauriliodasilva@gmail.com

Caroliny de Castro Emmanuel

Graduanda em Direito

Instituição: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

E-mail: caroliny.emmanuel@gmail.com

Teiliane Rodrigues Carneiro

Pós Doutora em Biotecnologia

Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

E-mail: teilipet@gmail.com



Paulo Silva Vieira Marques

Graduado em Engenharia Química

Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

E-mail: paulosvmarques@gmail.com

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a construção de um terrário em pequena escala visando simular condições do solo marciano e avaliar técnicas iniciais de terraformação. Utilizou-se solo análogo ao de Marte, coletado no Pico do Cabugi (RN, Brasil), devido à sua similaridade mineralógica com o solo do planeta vermelho. O experimento focou na melhoria da fertilidade do solo por meio do cultivo consorciado de milho (*Zea mays L.*) e alfafa (*Medicago sativa*), além da introdução de organismos extremófilos (tardígrados) para avaliação da viabilidade de formas de vida. Aspectos como pressão atmosférica e temperatura não foram simulados devido a limitações de recursos. Os resultados preliminares do ambiente aberto de controle indicaram crescimento vegetal satisfatório e leve elevação do pH do solo ao longo de 12 semanas, sugerindo potencial para enriquecimento progressivo do substrato. O estudo contribui como passo inicial para investigações futuras sobre agricultura em condições extraterrestres.

Palavras-chave: Terraformação. Marte. Solo Marciano. Terrário. Cultivo Consorciado.

ABSTRACT

This work aimed to construct a small-scale terrarium to simulate Martian soil conditions and evaluate initial terraforming techniques. Soil analogous to that of Mars, collected from Pico do Cabugi (RN, Brazil), was used due to its mineralogical similarity to the soil of the red planet. The experiment focused on improving soil fertility through intercropping of maize (*Zea mays L.*) and alfalfa (*Medicago sativa*), as well as the introduction of extremophilic organisms (tardigrades) to assess the viability of life forms. Aspects such as atmospheric pressure and temperature were not simulated due to resource limitations. Preliminary results from the open control environment indicated satisfactory plant growth and a slight increase in soil pH over 12 weeks, suggesting potential for progressive enrichment of the substrate. This study contributes as an initial step for future investigations into agriculture under extraterrestrial conditions.

Keywords: Terraforming. Mars. Martian Soil. Terrarium. Intercropping.

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo construir un terrario a pequeña escala para simular las condiciones del suelo marciano y evaluar técnicas iniciales de terraformación. Se utilizó suelo análogo al de Marte, recolectado en Pico do Cabugi (RN, Brasil), debido a su similitud mineralógica con el suelo del planeta rojo. El experimento se centró en mejorar la fertilidad del suelo mediante el cultivo intercalado de maíz (*Zea mays L.*) y alfalfa (*Medicago sativa*), así como en la introducción de organismos extremófilos (tardígrados) para evaluar la viabilidad de las formas de vida. Aspectos como la presión atmosférica y la temperatura no se simularon debido a limitaciones de recursos. Los resultados preliminares del entorno de control abierto indicaron un crecimiento satisfactorio de las plantas y un ligero aumento del pH del suelo durante 12 semanas, lo que sugiere un potencial para el enriquecimiento progresivo del sustrato. Este estudio constituye un primer paso para futuras investigaciones sobre agricultura en condiciones extraterrestres.



Palabras clave: Terraformación. Marte. Suelo Marciano. Terrario. Cultivo Intercalado.



1 INTRODUÇÃO

O processo de terraformação consiste na modificação teórica do ecossistema de um corpo celeste com a premissa central de transformar ambientes com condições adversas, como Marte, em locais habitáveis para seres humanos sem a dependência de trajes espaciais ou estruturas pressurizadas (BIRCH, 1992). Embora o conceito tenha sido popularizado pela ficção científica ao longo do século XX, a terraformação tem ganhado crescente atenção no meio acadêmico, sendo hoje considerada um campo de pesquisa legítimo que integra astrobiologia, engenharia planetária, ciência do solo e biotecnologia (COLEINE et al., 2025; DeBENEDICTIS et al., 2025).

Desde a década de 1960, surgem discussões sobre formas do ser humano tornar outras partes do Sistema Solar aptas à vida através de meios artificiais, como a adoção de microrganismos para converter a atmosfera de Vênus (SAGAN, 1961). No entanto, ainda hoje, esse processo se apresenta como um real desafio para a comunidade científica atual.

Para que a terraformação se concretize, diversas etapas interdependentes devem ser cumpridas. Primeiramente, faz-se necessária a modificação da atmosfera, de modo a garantir oxigênio suficiente para a respiração e proteção contra a radiação cósmica e ultravioleta, que atinge a superfície marciana de forma intensa devido à ausência de um campo magnético global (DeBENEDICTIS et al., 2025). Em seguida, é imprescindível a regulação da temperatura, especialmente em Marte, cuja temperatura média gira em torno de -125°C a $+20^{\circ}\text{C}$, demandando uma espécie de aquecimento global artificial por meio da liberação controlada de gases de efeito estufa ou de outras abordagens de engenharia climática (BIRCH, 1992). A presença de água em estado líquido é igualmente essencial para a manutenção de qualquer forma de vida. Em Marte, a água encontra-se predominantemente na forma de gelo nos polos e no subsolo do planeta, sendo necessário promover seu derretimento e manutenção no estado líquido. Ademais, o solo deve ser profundamente ajustado para viabilizar a agricultura, por meio da introdução de microrganismos capazes de transformar o regolito estéril em um substrato minimamente fértil (TARASASHVILI et al., 2023).

O solo marciano apresenta características particularmente desafiadoras para o cultivo de vegetais. Segundo dados obtidos pelas missões Viking, Phoenix e Curiosity, o regolito de Marte possui predominantemente óxidos de ferro — responsáveis pela coloração avermelhada do planeta —, além de silicatos, sulfatos e, notavelmente, percloratos em sua composição (YEN et al., 2005). Esses percloratos são sais tóxicos compostos de cloro e oxigênio, encontrados em Marte em concentrações até um milhão de vezes superiores às da Terra (SUTTER, B. et al., 2017), o que torna o solo extremamente hostil tanto para plantas quanto para seres humanos (WAMELINK, G. W. W. et al., 2014). A remoção ou neutralização desses compostos por meio da introdução de microrganismos constitui, portanto, um pré-requisito fundamental para qualquer tentativa de agricultura marciana, transformando o regolito estéril em um substrato minimamente fértil (TARASASHVILI et al., 2023).



Além da toxicidade do solo, a atmosfera marciana impõe restrições severas. Composta por aproximadamente 95% de dióxido de carbono, com pressão atmosférica equivalente a apenas 0,6% da terrestre, ela é incapaz de sustentar a respiração humana ou manter água no estado líquido por períodos prolongados na superfície. Além disso, a radiação ultravioleta que alcança o solo, sem o filtro de uma camada de ozônio, representa um fator adicional de hostilidade para organismos vivos. Diante desse cenário, a terraformação de Marte exigiria não apenas intervenções no solo, mas uma reengenharia atmosférica de larga escala — um desafio que, embora teoricamente possível, ainda está muito além das capacidades tecnológicas atuais (DeBENEDICTIS et al., 2025).

Diversas tecnologias têm sido propostas para viabilizar etapas específicas desse processo. A liberação de gases de efeito estufa, como perfluorocarbonetos, poderia elevar gradualmente a temperatura do planeta através de uma maior retenção de radiação infravermelha pela atmosfera do planeta vermelho. Além disso, avanços em engenharia genética e biologia sintética possibilitariam a criação de organismos extremófilos modificados, capazes de sobreviver e desempenhar funções metabólicas em condições marcianas, contribuindo para o enriquecimento do solo e para a produção inicial de oxigênio. Cianobactérias, por exemplo, têm sido estudadas por sua capacidade de fixar nitrogênio e precipitar carbonatos em solos análogos ao marciano, representando agentes biológicos promissores para as primeiras fases de uma terraformação (TARASASHVILI et al., 2023; NAWAZ et al., 2024; COLEINE et al., 2025).

Marte é considerado um dos candidatos mais promissores para a terraformação, dada a sua relativa proximidade com a Terra — cerca de 225 milhões de quilômetros em média — e certas semelhanças físicas, como a duração do dia, de aproximadamente 24 horas e 37 minutos, a inclinação axial semelhante à terrestre, que produz estações do ano, e a presença confirmada de água em forma de gelo (YEN et al., 2005). No entanto, os desafios são imensos e a tecnologia necessária encontra-se ainda em estágio inicial de desenvolvimento, o que reforça a importância de estudos experimentais em escala reduzida como forma de compreender os obstáculos fundamentais envolvidos.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe a construção de um ecossistema em miniatura, com volume máximo de 4 decímetros cúbicos, que simule as condições do solo marciano. A pesquisa tem foco na adaptação desse solo, caracterizado por ser árido, pobre em nutrientes e rico em óxidos de ferro, em comparação aos solos terrestres (YEN et al., 2005; COUSIN et al., 2014). Cabe ressaltar que, devido a limitações de recursos e de escala, aspectos como a composição atmosférica marciana, as pressões extremamente baixas e as grandes variações de temperatura não foram simulados no experimento, constituindo limitações reconhecidas do estudo.

Para a construção de um terrário o mais semelhante ao ambiente marciano, utilizou-se solo coletado no Pico do Cabugi, localizado no Rio Grande do Norte, Brasil. Este sítio geológico foi selecionado em razão de suas características mineralógicas compatíveis com as do regolito marciano.



O Pico do Cabugi é constituído por basaltos alcalinos ricos em olivina, titanogita e minerais óxidos de ferro, com teor de SiO₂ variando entre 39% e 45% (FERREIRA; SIAL, 2002). Essa composição basáltica e ferruginosa aproxima-se da descrição do solo marciano obtida pelas missões MER e Viking, caracterizado por óxidos de ferro, silicatos e sulfatos (YEN et al., 2005; CLARK et al., 1982). A prática de utilizar basaltos triturados como simulantes do regolito marciano é consolidada na literatura aeroespacial (PETERS et al., 2008; FACKRELL et al., 2021), o que fundamenta a escolha do Pico do Cabugi como sítio de coleta para o presente estudo.

O experimento enfatiza a melhoria da fertilidade do solo por meio do cultivo consorciado de milho (*Zea mays* L.) e alfafa (*Medicago sativa*). A alfafa foi selecionada por sua comprovada capacidade de fixação biológica de nitrogênio, processo mediado pela simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium* presentes em suas raízes (KEBEDE, 2021; WAN et al., 2023; RAINWATER; MUKHERJEE, 2021). A fixação de nitrogênio é um fator crítico para a fertilidade do solo, uma vez que o nitrogênio é componente essencial de aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos — moléculas indispensáveis para qualquer forma de vida. O milho, por sua vez, foi escolhido por sua elevada taxa fotossintética, característica das plantas de metabolismo C₄, que contribui significativamente para a produção de oxigênio e para o incremento de matéria orgânica no solo por meio de sua biomassa radicular e aérea (NUNES; CECCON, 2011; LIU et al., 2022). A combinação dessas duas espécies configura um sistema de plantação consorciada clássico, no qual as plantas colaboram mutuamente para a criação de um ecossistema mais equilibrado e produtivo (ALMEIDA, 2022).

Adicionalmente, foram introduzidos tardígrados (filo Tardigrada), organismos extremófilos microscópicos reconhecidos por sua notável capacidade de sobrevivência em condições adversas. Esses organismos são capazes de entrar em estado de anidrobiose — no qual se contraem em forma de barril e entram em suspensão metabólica —, resistindo a desidratação extrema, temperaturas que variam de próximas ao zero absoluto até mais de 150°C, pressões elevadas e doses letais de radiação (HORIKAWA et al., 2013; CHAVEZ et al., 2019; YOSHIDA et al., 2017). Sua inclusão no experimento teve como finalidade avaliar a viabilidade de formas de vida no ambiente simulado, funcionando como bioindicadores das condições do terrário (BAKERMANS, C. et al., 2026).

Após replicar as condições iniciais do solo marciano, o projeto buscou modificar progressivamente o ambiente dentro do recipiente, observando se tais alterações possibilitam a aproximação das condições do solo às terrestres ao longo do tempo. Dessa forma, o estudo pretende contribuir com dados preliminares sobre a viabilidade de técnicas iniciais de terraformação, abordando os desafios e as possibilidades de adaptação de ambientes extraterrestres para sustentar a vida, e servindo como base para investigações futuras mais avançadas sobre agricultura em condições marcianas.



2 OBJETIVOS

O texto tem como objetivo geral e principal construir um ecossistema em miniatura, com volume de 4 decímetros cúbicos (4 dm^3), utilizando solo análogo ao marciano coletado no Pico do Cabugi (RN), a fim de investigar a viabilidade de adaptar as condições edáficas de Marte para torná-las mais próximas às terrestres por meio de técnicas de cultivo consorciado e da introdução de organismos extremófilos. O trabalho tem como objetivos específicos (i) Replicar, dentro do recipiente de acrílico, as condições iniciais do solo marciano com base na composição mineralógica (YEN et al., 2005; PETERS et al., 2008); (ii) Avaliar o potencial da alfafa (*Medicago sativa*) na fixação biológica de nitrogênio e no enriquecimento nutricional do solo análogo; (iii) Verificar a contribuição do milho (*Zea mays* L.) para a oxigenação do ambiente e o incremento de matéria orgânica no substrato; (iv) Introduzir tardígrados (filo Tardigrada) como bioindicadores, a fim de avaliar se as condições do terrário permitem a sobrevivência de organismos vivos ao longo do experimento; (v) Monitorar, ao longo do tempo, as modificações nas propriedades do solo dentro do sistema fechado, observando se as intervenções realizadas possibilitam a aproximação das condições edáficas às terrestres; (vi) Contribuir com dados preliminares sobre os desafios e as possibilidades da terraformação em escala reduzida, servindo como base para investigações futuras mais avançadas sobre agricultura em condições extraterrestres.

3 METODOLOGIA

3.1 REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento como um todo foi realizado em parceria com instituição Colégio Brigadeiro Newton Braga (RJ), que, além de fornecer orientação pedagógica durante a pesquisa e o experimento, por muitas vezes forneceu as suas instalações para as realizações práticas da metodologia.

3.2 CONSTRUÇÃO DO TERRÁRIO

O experimento foi conduzido em um recipiente de acrílico com espessura de 5 mm e volume máximo de 4 decímetros cúbicos (4 dm^3). A escolha do acrílico como material estrutural fundamentou-se em sua resistência mecânica, transparência para observação visual do sistema e capacidade de suportar o peso do substrato sem deformação significativa. As dimensões reduzidas do recipiente foram definidas de modo a viabilizar a manutenção e o monitoramento do ecossistema em ambiente laboratorial, respeitando as limitações de recursos disponíveis para o projeto.

3.3 SOLO ANÁLOGO AO MARCIANO

O substrato utilizado no experimento foi coletado no Pico do Cabugi, formação geológica de origem vulcânica localizada no município de Angicos, Rio Grande do Norte, Brasil. Este sítio foi



selecionado em razão da similaridade mineralógica de seu solo com o regolito marciano, apresentando composição rica em basalto, óxidos de ferro e silicatos (PETERS et al., 2008). A utilização de solos análogos terrestres é uma prática consolidada na pesquisa aeroespacial e permite a realização de experimentos representativos sem a necessidade de amostras extraterrestres reais (FACKRELL et al., 2021).

Antes do início do cultivo, o solo análogo passou por procedimentos preliminares de preparação. Uma vez que o regolito marciano real apresenta elevadas concentrações de percloratos — sais tóxicos compostos de cloro e oxigênio que inviabilizam o crescimento vegetal e representam risco à saúde humana —, o solo coletado no Pico do Cabugi, embora não contenha percloratos nas mesmas proporções, foi tratado com adição inicial de adubo NPK produzido em laboratório para simular uma etapa de remediação e enriquecimento mínimo do substrato, aproximando o experimento das condições que seriam necessárias em uma intervenção real no solo de Marte.

3.4 CULTIVO CONSORCIADO: MILHO E ALFAFA

A estratégia central do experimento consiste no cultivo consorciado de duas espécies vegetais complementares: milho (*Zea mays* L., família Poaceae) e alfafa (*Medicago sativa*, família Fabaceae). A seleção dessas espécies baseou-se em critérios funcionais específicos e complementares para a melhoria das condições edáficas do terrário.

O milho foi escolhido por três razões principais: (i) seu curto ciclo de vida, que permite observar mudanças significativas no solo em período reduzido; (ii) sua elevada taxa fotossintética, característica das plantas de metabolismo C4, que contribui para a produção de oxigênio no ambiente do terrário por meio da conversão de dióxido de carbono (NUNES; CECCON, 2011); e (iii) sua capacidade de incrementar a matéria orgânica do solo por meio da biomassa radicular e aérea produzida, além de promover a estruturação física do substrato e a retenção de água através do sistema radicular.

A alfafa, por sua vez, foi incorporada ao experimento por sua comprovada capacidade de fixação biológica de nitrogênio atmosférico, processo mediado pela simbiose com bactérias rizóbias (*Rhizobium* spp.) presentes em nódulos radiculares (KEBEDE, 2021; WAN et al., 2023). A baixa disponibilidade desse nutriente no solo marciano e em seu análogo terrestre representa um dos maiores desafios para o cultivo, tornando a fixação biológica uma estratégia indispensável. A expectativa é que o cultivo simultâneo dessas duas espécies configure um sistema de plantação consorciada clássico, no qual as plantas colaboram mutuamente: a alfafa enriquece o solo com nitrogênio, beneficiando o milho, enquanto ambas promovem cobertura vegetal mais densa, reduzindo a erosão e melhorando a estrutura do substrato ao longo do tempo (LIMA FILHO, 2023).



Para efeito de comparação e análise mais detalhada sobre a interação entre as duas espécies, foi conduzido paralelamente o cultivo em ambiente aberto, em condições terrestres normais (LIMA FILHO, 2023). Esse experimento paralelo permite avaliar o impacto das restrições ambientais do terrário; como a vedação, que impede a troca gasosa com o meio; sobre o desenvolvimento vegetal, isolando variáveis e fornecendo um grupo controle para a interpretação dos resultados. Além disso, provendo, sobretudo, a possibilidade de medir o crescimento das plantas sem a necessidade de comprometer a vedação do terrário, uma vez que o grupo controle também será plantado em solo análogo.

3.5 INTRODUÇÃO DE ORGANISMOS EXTREMÓFILOS

Com o objetivo de avaliar a viabilidade de formas de vida animal no ambiente simulado, foram introduzidos no terrário organismos extremófilos pertencentes ao filo Tardigrada (tardígrados).

Os tardígrados são microinvertebrados amplamente reconhecidos na literatura por sua excepcional resistência a condições adversas (FÖRSTER et al., 2012). Quando submetidos a estresses ambientais severos, esses organismos são capazes de entrar em estado de anidrobiose — criptobiose induzida por desidratação —, no qual se contraem em uma estrutura compacta denominada *tun*, reduzindo drasticamente sua atividade metabólica. Nesse estado, tardígrados já demonstraram capacidade de sobreviver a temperaturas próximas ao zero absoluto, radiação ionizante em doses letais para a maioria dos organismos, pressões extremas e exposição direta ao vácuo espacial (HORIKAWA et al., 2013; CHAVEZ et al., 2019; PULSCHEN et al., 2010). Sua inclusão no experimento visa funcionar como bioindicador primário das condições do terrário: a sobrevivência e eventual retorno à atividade dos tardígrados sinalizariam que o ambiente atingiu condições mínimas para a manutenção de vida animal. A obtenção dos tardígrados foi feita por meio da utilização de filtros e uma corrente de água, juntamente com um material orgânico – musgos – que possuem abundância desses microinvertebrados.

3.6 IRRIGAÇÃO E MANUTENÇÃO

Para manter a umidade necessária ao desenvolvimento das plantas e à sobrevivência dos organismos introduzidos, foi empregado um sistema mínimo de irrigação controlada. A quantidade de água utilizada foi deliberadamente restrita, simulando as condições de escassez hídrica que caracterizariam qualquer tentativa real de cultivo em Marte, onde o racionamento e a otimização de recursos seriam fatores críticos para o sucesso de iniciativas de colonização.



3.7 MONITORAMENTO E ANÁLISE

Para avaliar o impacto das intervenções realizadas sobre o solo, foram estabelecidos os seguintes parâmetros de monitoramento:

pH do solo: Indicador de acidez e alcalinidade, cujas variações podem indicar alterações na composição química do substrato decorrentes do processo de enriquecimento e do metabolismo vegetal (CARVALHO LEITE, 2004). Essa análise do pH do solo do grupo controle tem como finalidade avaliar o impacto do cultivo consorciado;

Crescimento e saúde das plantas: avaliados por meio de observação visual do vigor, altura, coloração foliar e desenvolvimento radicular, servindo como indicadores indiretos das condições atmosféricas e edáficas do terrário com a principal finalidade avaliar a possibilidade de um organismo complexo se desenvolver em um ambiente fechado, análogo ao de Marte;

Sobrevivência dos extremófilos: monitoramento da atividade e viabilidade dos tardígrados como indicadores biológicos da habitabilidade do sistema, que só será realizada após 10 anos do início do experimento, ou seja, ainda não foi realizada.

Cabe ressaltar que, devido a limitações de recursos, não foram empregados equipamentos de monitoramento atmosférico de alta precisão, como sensores de oxigênio ou dióxido de carbono. As inferências sobre as condições atmosféricas do terrário foram realizadas, portanto, por meio dos indicadores indiretos mencionados acima, constituindo uma limitação reconhecida do estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PRODUÇÃO DO ADUBO NPK:

Para confeccionar o adubo, foram processados por cinco minutos: 181 gramas de casca de banana (Musa); 29,8 gramas de casca de ovo; 100 gramas de borra de café; 9,9 gramas de canela; e 1 litro de água. Após isso, a mistura resultante foi colocada em ambiente escuro e fechado por dez dias a fim de realizar fermentação para que o adubo fosse obtido.



Figura 1 - Adubo NPK pronto



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

4.2 OBTENÇÃO DOS TARDÍGRADOS:

Para obter os tardígrados, primeiramente, ocorreu a coleta de musgos – material orgânico em que eles são abundantes – na floresta da Tijuca (RJ). Após isso, os musgos foram colocados por três dias em pano de poliéster poroso, juntamente com uma porção de água em um funil, cuja ponta estava tampada para que ocorresse a decantação. Esse processo foi feito simultaneamente em 8 funis, resultando em uma solução rica em tardígrados como produto final.

Figura 2 - Coleta do musgo na floresta da Tijuca



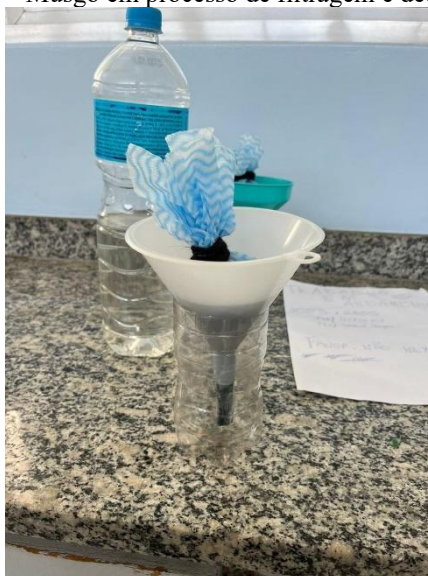
Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Figura 3 - Acúmulo dos musgos coletados:



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Figura 4 - Musgo em processo de filtragem e decantação:



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Figura 5 - Acúmulo do líquido rico em tardígrados obtido de diversos musgos:



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

4.3 RESULTADOS DO ACOMPANHAMENTO DAS PLANTAS DO GRUPO CONTROLE:

Tabela 1 – Acompanhamento das plantas do ambiente aberto (grupo controle)

Semana	Tamanho médio das plantas (cm)	Aparência das plantas	pH do solo	Alcalinidade total (ppm)	Ácido cianúrico (ppm)	Cloro total (ppm)
Semana 1	Não aparente	Não aparente	6	160	50	4
Semana 2	3.2 cm	Muito boa	6.3	160	50	4
Semana 3	7.5 cm	Muito boa	6.4	120	50	4
Semana 4	13.7 cm	Muito boa	6.4	120	50	3
Semana 5	20.5 cm	Muito boa	6.4	120	50	3
Semana 6	29.8 cm	Muito boa	6.4	120	50	3
Semana 7	33.9 cm	Muito boa	6.5	120	50	3
Semana 8	37.1 cm	Boa	6.6	120	50	3
Semana 9	42.3 cm	Boa	6.6	120	50	3
Semana 10	45 cm	Mediana	6.6	120	50	3
Semana 11	48.5 cm	Boa	6.6	120	50	3
Semana 12	50 cm	Mediana	6.6	120	50	3

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Figura 6 – Dados semana 1 ambiente aberto (grupo controle)



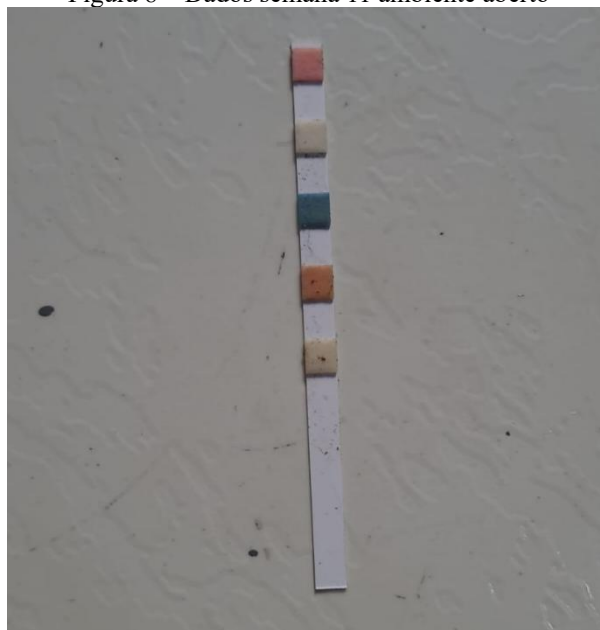
Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Figura 7 – Dados semana 6 ambiente aberto



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Figura 8 – Dados semana 11 ambiente aberto



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

4.4 RESULTADO DO ACOMPANHAMENTO DAS PLANTAS DO TERRÁRIO:

Tabela 2 – Acompanhamento das plantas do terrário

Semana	Tamanho médio das plantas (cm)	Aparência das plantas	pH do solo	Alcalinidade total (ppm)	Ácido cianúrico (ppm)	Cloro total (ppm)
Semana 1	Não é possível medir	Não aparente	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir
Semana 2	Não é possível medir	Boa	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir
Semana 3	Não é possível medir	Boa	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir
Semana 4	Não é possível medir	Muito boa	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir
Semana 5	Não é possível medir	Muito boa	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir
Semana 6	Não é possível medir	Muito boa	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir
Semana 7	Não é possível medir	Muito boa	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir
Semana 8	Não é possível medir	Muito boa	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir
Semana 9	Não é possível medir	Mediana	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir
Semana 10	Não é possível medir	Mediana	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir

Semana 11	Não é possível medir	Ruim	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir
Semana 12	Não é possível medir	Mediana	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir	Não é possível medir

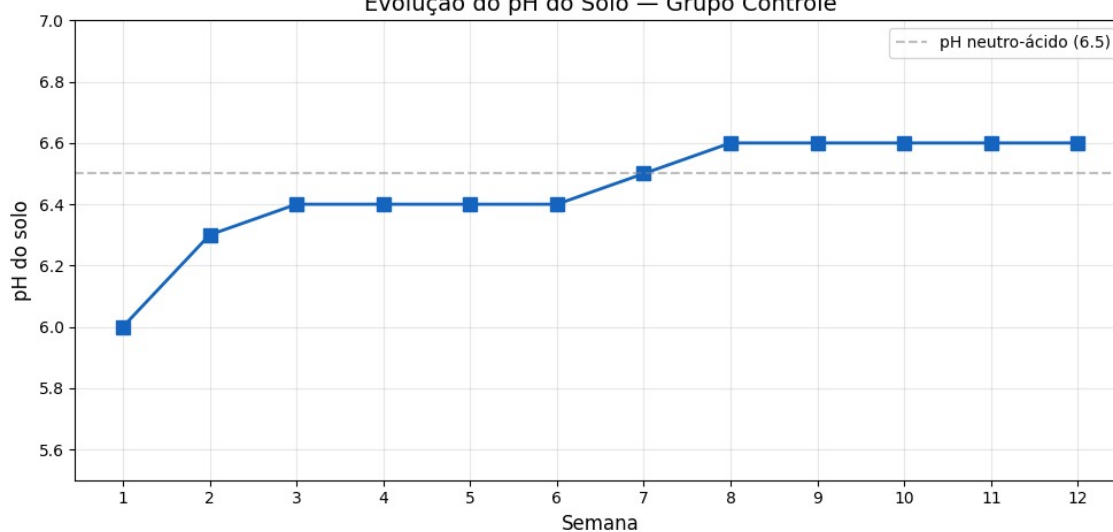
Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Figura 9 - Imagem da Semana 1 das plantas do terrário



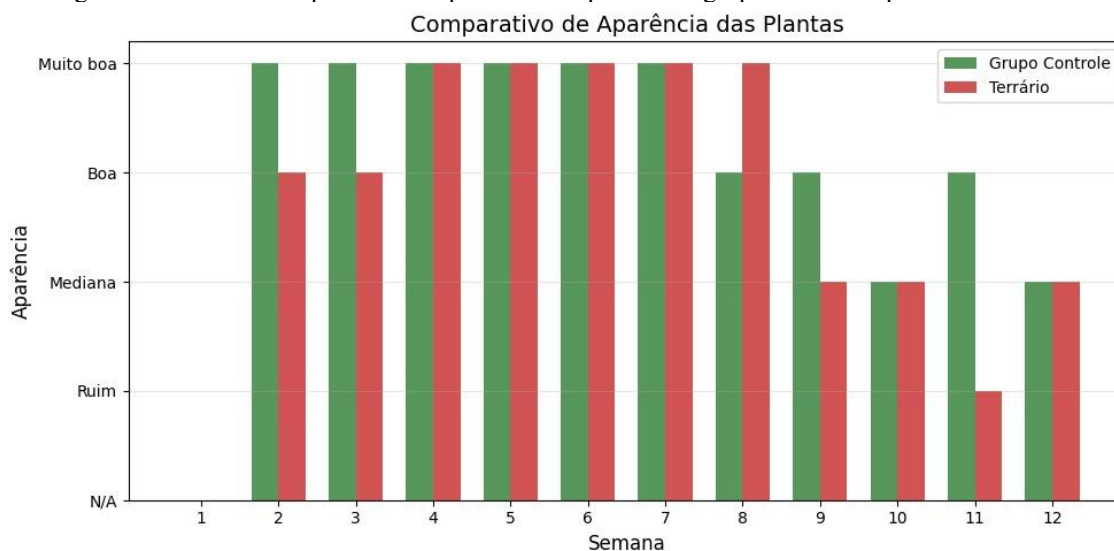
Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Figura 10 - Gráfico de evolução do pH do Solo - Grupo Controle
Evolução do pH do Solo — Grupo Controle



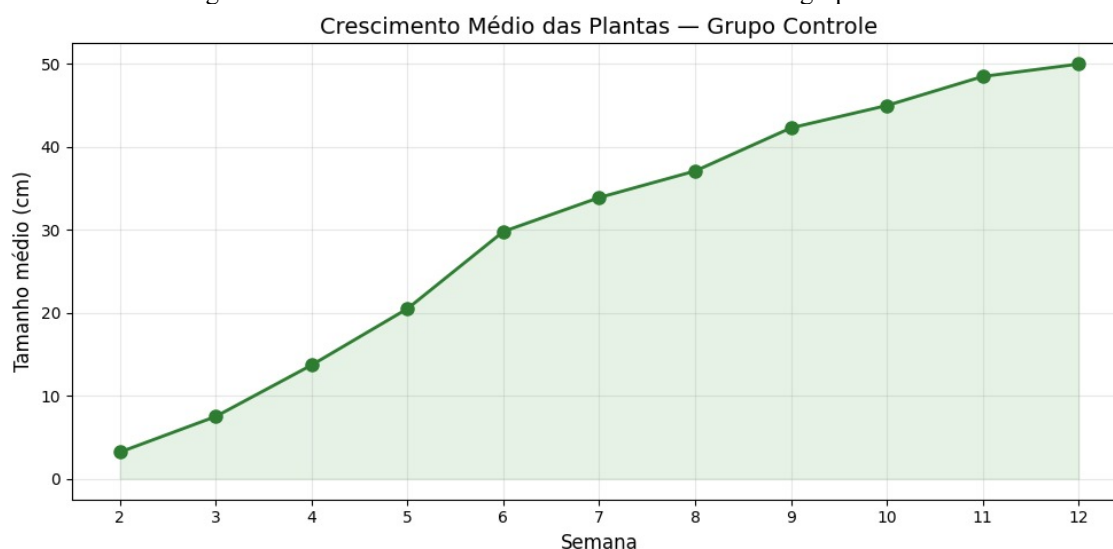
Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Figura 11 - Gráfico comparativo de aparência das plantas do grupo controle x plantas do terrário



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Figura 12 - Gráficos do Crescimento Médio das Plantas - grupo controle



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o experimento científico a fim de estudar a terraformação do solo, notou-se que alguns pontos se destacaram: (i) a limitação do controle da entrada e saída de ar do terrário; (ii) a impossibilidade de aferir com precisão as medidas das plantas do terrário; (iii) a impossibilidade de medir as características químicas do solo do terrário; (iv) a tendência da melhora do solo do grupo controle; (v) a eficácia do adubo obtido; (vi) a eficácia do método de extração dos tardígrados; (vii) a impossibilidade de simular todas as características do ambiente marciano.

O fato de não ser possível controlar por completo a troca gasosa do terrário com o meio externo é um fator que torna, mesmo com melhores materiais, impossível aferir a eficiência de gramíneas como o milho em mudar a composição atmosférica local. Contudo, a fim de aproximar o resultado do real,



o terrário foi vedado para reduzir ao máximo a interferência externa no experimento. Assim, é possível aferir que o milho e a alfafa conseguiram sobreviver em um ambiente fechado sem problemas.

A não medição das dimensões das plantas e das características físico-químicas do solo do terrário – como pH – dificultaram, mas não impossibilitaram, a inferência de um crescimento saudável proveniente de um solo adequado para o plantio. Durante as 12 semanas de realização do experimento, foi possível deduzir, a partir de uma análise observacional, que o grupo controle e o grupo plantado no terrário obtiveram um desenvolvimento visualmente similar, o que corrobora a eficácia do tratamento preliminar realizado no solo análogo.

Além disso, cabe ressaltar que o crescimento vegetal é quase que impossível em faixas de pH inadequadas, ou seja, é possível, por dedução, entender que o pH do terrário se manteve estável, uma vez que houve crescimento vegetal significativo.

Com a análise físico-química do solo do grupo controle – mesmo solo utilizado no terrário – é possível afirmar que o plantio consorciado de milho e alfafa, ao longo das 12 semanas de experimentos, promoveu melhoras no solo, uma vez que os seus indicadores tendem à estabilização.

A eficácia do adubo NPK utilizado é notável, já que o solo original não possibilitaria nenhum desenvolvimento vegetal das espécies utilizadas. Além disso, visando um plano de terraformação em larga escala, cabe ressaltar que os materiais utilizados são restos de comida e de fácil acesso e baratos, o que facilita muito a sua produção em larga escala.

O método de extração dos tardígrados mostrou-se eficiente, uma vez que foi obtido, por meio de um processo simples, mais de 50 ml de líquido rico em tardígrados. Abundância essa comprovada após observações em microscópio.

Por fim, as características marcianas não simuladas, apesar de relevantes, não interferem de forma significativa na análise principal do artigo. Como o plantio consorciado em território marciano ocorreria, em primeiro momento, em ambiente com temperatura e pressão controlados, os dados obtidos se mostram suficientes para uma implementação inicial do cultivo.

Tais fatores contribuem para reduzir a precisão do experimento, porém, é importante destacar que, apesar de tais limitações, o experimento está sendo conduzido com o máximo de cuidado possível. De tal forma, foram utilizados todos os meios e métodos disponíveis para garantir que os resultados sejam os de máxima confiança praticável. Isso vai desde a utilização das tecnologias mais avançadas que foram encontradas ao acompanhamento constante das condições experimentais para minimizar as margens de erro.

Contudo, é de suma importância reconhecer que, assim como qualquer outro experimento científico, os dados obtidos através das pesquisas não devem ser considerados como verdades absolutas. Na ciência, é essencial compreender que os resultados representam um ponto de ignição para futuras investigações. Apesar de apresentar limitações, os dados coletados a partir dessa pesquisa



podem ser de extremo valor para uma futura pesquisa contínua e para o desenvolvimento de novas técnicas e abordagens na terraformação de Marte.

A pesquisa feita fundamenta-se na busca por métodos e opções viáveis para terraformar o planeta Marte. Isso acaba por envolver uma análise minuciosa e cuidadosa das condições do ambiente do planeta vermelho e das possíveis intervenções que podem ser feitas para torná-lo habitável para os seres humanos. Baseando-se em pesquisas acadêmicas anteriores, foram identificadas algumas alternativas promissoras para esse objetivo. Tais alternativas estão sendo testadas no ambiente de testes elaborado.



REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. M. de. Efeitos do cultivo de alfafa sobre a ciclagem de nutrientes para a cultura do milho. 2022. Dissertação (Mestrado em Agronomia) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2022. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/28120>.
- BAKERMANS, C.; VECCHI, M.; PEARCE, G. Short-term survival of tardigrades (*Ramazzottius cf. varicornatus* and *Hypsibius exemplaris*) in martian regolith simulants (MGS-1 and OUCM-1). *International Journal of Astrobiology*, Cambridge, v. 24, e3, 2026. DOI: 10.1017/S1473550425000132.
- BIRCH, P. Terraforming Mars quickly. *Journal of the British Interplanetary Society*, London, v. 45, p. 331–340, 1992.
- CARVALHO LEITE, L. F. Matéria orgânica do solo. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2004. 31 p. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 97).
- CHAVEZ, C. et al. The tardigrade damage suppressor protein binds to nucleosomes and protects DNA from hydroxyl radicals. *eLife*, Cambridge, v. 8, e47682, 2019. DOI: 10.7554/eLife.47682.
- CLARK, B. C. et al. Chemical composition of Martian fines. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v. 87, n. B12, p. 10059–10067, 1982. DOI: 10.1029/JB087iB12p10059.
- COLEINE, C. et al. The role of extremophile microbiomes in terraforming Mars. *Communications Biology*, London, v. 8, art. 1588, 2025. DOI: 10.1038/s42003-025-08973-1.
- COUSIN, A. et al. Compositions of coarse and fine particles in Martian soils at Gale: a window into the production of soils. *Icarus*, San Diego, v. 249, p. 22–42, 2014. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.04.052.
- DeBENEDICTIS, E. A. et al. The case for Mars terraforming research. *Nature Astronomy*, London, v. 9, p. 634–639, 2025. DOI: 10.1038/s41550-025-02548-0.
- FACKRELL, L. E. et al. Development of martian regolith and bedrock simulants: potential and limitations of martian regolith as an in-situ resource. *Icarus*, San Diego, v. 354, art. 114055, 2021. DOI: 10.1016/j.icarus.2020.114055.
- FERREIRA, V. P.; SIAL, A. N. Pico do Cabugi, RN — Registro do mais jovem magmatismo continental do Brasil. In: SCHOBENHAUS, C. et al. (Ed.). *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. 1. ed. Brasília: DNPM/CPRM — Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), 2002. v. 1, p. 393–398.
- FÖRSTER, F. et al. Transcriptome analysis in tardigrade species reveals specific molecular pathways for stress adaptations. *Bioinformatics and Biology Insights*, Auckland, v. 6, p. 69–96, 2012. DOI: 10.4137/BBI.S9150.
- HORIKAWA, D. D. et al. Analysis of two stress-responsive genes in the tardigrade *Ramazzottius varicornatus* after exposure to UVC radiation. *Astrobiology*, New Rochelle, v. 13, n. 11, p. 1007–1016, 2013. DOI: 10.1089/ast.2013.0993.
- KEBEDE, E. Contribution, utilization, and improvement of legumes-driven biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, Lausanne, v. 5, art. 767998, 2021. DOI: 10.3389/fsufs.2021.767998.



LIMA FILHO, O. F. de et al. (Ed.). Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2023. v. 1. 586 p.

LIU, L. et al. The CO₂ fertilization effect on leaf photosynthesis of maize (*Zea mays* L.) depends on growth temperatures with changes in leaf anatomy and soluble sugars. *Frontiers in Plant Science*, Lausanne, v. 13, art. 890928, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.890928.

NAWAZ, T. et al. Cyanobacteria-based approaches and nanotechnology in sustainable agriculture for promoting plant growth. *Molecules*, Basel, v. 29, n. 11, art. 2534, 2024. DOI: 10.3390/molecules29112534.

NUNES, J. G. S.; CECCON, G. Eficiência fotossintética do milho safrinha solteiro e consorciado com *Brachiaria ruziziensis*. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 29., 2011, Goiânia. Anais [...]. Goiânia: Embrapa, 2011.

PETERS, G. H. et al. Mojave Mars simulant — Characterization of a new geologic Mars analog. *Icarus*, San Diego, v. 197, n. 2, p. 470–479, 2008. DOI: 10.1016/j.icarus.2008.05.004.

PULSCHEN, A. A.; MENECHIN, S. P. Estabelecimento de uma cultura de tardígrados limno-terrestres em laboratório e desenvolvimento de metodologias alternativas de desidratação de tardígrados. *Evidência*, Joaçaba, v. 10, n. 1-2, p. 89–100, 2010.

RAINWATER, R.; MUKHERJEE, A. The legume-rhizobia symbiosis can be supported on Mars soil simulants. *PLOS ONE*, San Francisco, v. 16, n. 12, e0259957, 2021. DOI: 10.1371/journal.pone.0259957.

SAGAN, C. The planet Venus. *Science*, Washington, v. 133, n. 3456, p. 849–858, 1961. DOI: 10.1126/science.133.3456.849.

SUTTER, B. et al. Measurements of oxychlorine species on Mars. *International Journal of Astrobiology*, Cambridge, v. 16, n. 3, p. 203–217, 2017. DOI: 10.1017/S1473550416000057.

TARASASHVILI, M. V. et al. Cyanobacterial nitrogen fixation and carbonate precipitation in a simulated Martian soil (Artificial Mars Ground — AMG). *Life Sciences in Space Research*, Amsterdam, v. 37, p. 65–77, 2023. DOI: 10.1016/j.lssr.2023.02.001.

WAMELINK, G. W. W. et al. Can plants grow on Mars and the Moon: a growth experiment on Mars and Moon soil simulants. *PLOS ONE*, San Francisco, v. 9, n. 8, e103138, 2014. DOI: 10.1371/journal.pone.0103138.

WAN, W. et al. Alfalfa growth and nitrogen fixation in saline soils under nitrogen supply. *Frontiers in Plant Science*, Lausanne, v. 14, art. 1143138, 2023. DOI: 10.3389/fpls.2023.1143138.

YOSHIDA, Y. et al. Comparative genomics of the tardigrades *Hypsibius dujardini* and *Ramazzottius varieornatus*. *PLOS Biology*, San Francisco, v. 15, n. 7, e2002266, 2017. DOI: 10.1371/journal.pbio.2002266.

YEN, A. S. et al. An integrated view of the chemistry and mineralogy of martian soils. *Nature*, London, v. 436, p. 49-54, 2005. DOI: 10.1038/nature03637.

