

Artigo de Pesquisa

Transformações mineralógicas em rochas vulcânicas ácidas do Grupo Serra Geral e seu potencial como Agrominerais Silicáticos (ASi): interações com microrganismos em ensaios com milho

Mineralogical transformations in acidic volcanic rocks of the Serra Geral Group and their potential as Silicate Agrominerals (SiA): interactions with microorganisms in corn assay

Gabriel Allebrandt Thomas¹ , Tobias Schneider¹ , Lucas Vinicius Oliveira² 
& Andrea Sander³ 

¹Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, Brasil. E-mail: gabriel.athomas@hotmail.com; tobiasch31@gmail.com

²Universidade do Vale do Rio dos Sinos, itt Oceaneon, São Leopoldo, Brasil. E-mail: LUCASVINI@unisinos.br

³Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM, Departamento de Relações Institucionais e Divulgação, Porto Alegre, Brasil. E-mail: andrea.sander@sgb.gov.br

Resumo: A demanda global por alimentos e a dependência da agricultura brasileira de fertilizantes importados destacam a necessidade de fontes alternativas de nutrientes baseadas em georrecursos locais. Este estudo investiga o potencial agrônomo de duas rochas do Grupo Serra Geral, um riolito e um dacito, utilizadas como agrominerais silicáticos (ASi) em ensaios com milho (*Zea mays*). O delineamento experimental foi inovador, pois as plantas foram cultivadas rochas cominuídas misturado com cama de frango, sem adição de solo, a fim de isolar as interações entre minerais, matéria orgânica e sistema radicular. Análises petrográficas, DRX, FRX e MEV foram realizadas nos pós de rocha antes e após ensaios com durações de 60 e 216 dias. Os resultados revelam transformações mineralógicas e alterações na matriz desvitrificada rica em feldspato alcalino, enquanto imagens de MEV indicam o desenvolvimento de comunidades microbianas associadas às superfícies minerais e as características em microescala da morfologia dos grãos. Essas observações indicam que a biointemperização mediada por microrganismos desempenha um papel central na dissolução mineral e na liberação de nutrientes do pó de rocha, apoiando o uso dessas rochas vulcânicas como fontes eficazes de nutrientes essenciais e reforçando seu potencial como agrominerais silicáticos para reduzir a dependência de fertilizantes químicos em sistemas agrícolas sustentáveis no Brasil.

Palavras-chave: Biointemperismo microbiano; Pó de rocha; Remineralização de solos; Sustentabilidade.

Abstract: Global demand for food and Brazilian agriculture's dependence on imported fertilizers highlight the need for alternative nutrient sources derived from local georesources. This study investigates the agronomic potential of two rocks from the Serra Geral Group, a rhyolite and a dacite, used as silicate agrominerals (ASi) in assay with maize (*Zea mays*). The experimental design was innovative because plants were grown in rock powder mixed with chicken litter, without the addition of soil, to isolate the interactions between minerals, organic matter, and the root system. Petrographic analyses, XRD, XRF, and SEM were performed on the rock powders before and after assay lasting 60 and 216 days. The results reveal mineralogical transformations and alterations in the devitrified matrix rich in alkali feldspar, while SEM images indicate the development of microbial communities associated with mineral surfaces and microscale characteristics of grain morphology. These observations indicate that bioweathering mediated by microorganisms plays a central role in mineral dissolution and nutrient release from rock dust. The finding supports the use of these volcanic rocks as effective sources of essential nutrients and reinforces their potential as silicate agrominerals to reduce dependence on synthetic inputs in sustainable agricultural systems in Brazil.

Keywords: Microbial bioweathering; Rock dust; Soil remineralization; Sustainability.

1. Introdução

A projeção da Organização das Nações Unidas (ONU, 2022) de que a população global ultrapassará nove bilhões de pessoas até 2050 torna a segurança alimentar um desafio, demandando um aumento de 60% na produção agrícola. Para enfrentar essa pressão, agravada por fatores como urbanização, mudanças nos padrões alimentares e os impactos das mudanças climáticas, é urgente a adoção de práticas agrícolas sustentáveis. Essa transição é essencial para evitar a degradação dos solos e proteger os ecossistemas naturais, bases fundamentais para a saúde do solo e uma produtividade agrícola contínua (Pawlak; Kołodziejczak, 2020; Rehman *et al.*, 2022; Broom, 2020).

Neste contexto, o fornecimento adequado de nutrientes, diante da instabilidade nos preços dos fertilizantes químicos, destaca a importância de estratégias alternativas. A remineralização de solos com rochas cominuídas é uma solução possível, oferecendo uma alternativa viável do ponto de vista ambiental, social e econômico para a revitalização de solos degradados (Bezerra, 2010; Argenta, 2023).

Contudo, o marco regulatório brasileiro para essa prática, definido pela Instrução Normativa nº 5/2016 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (BRASIL, 2016), estabelece critérios, como somatório de bases $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$ maior ou igual a 9%, teor mínimo de K_2O de 1% e limite de sílica livre (quartzo) menor ou igual a 25%, que restringem a elegibilidade de diversos grupos de rochas como remineralizadores (REM). A literatura científica, no entanto, demonstra que essa não é a única via para o uso seguro e eficaz de materiais geológicos na agricultura. Rochas silicáticas, embora possam não se enquadrar estritamente na definição de “remineralizadores” estabelecida pela Instrução Normativa nº 5 do MAPA (BRASIL, 2016), podem representar uma fonte segura de nutrientes, contribuindo especialmente para diminuir a crítica dependência brasileira de potássio (K). Além de K, esses materiais podem portar teores relevantes de cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P) e micronutrientes, distribuídos em minerais de reatividade variável, podendo ser enquadrados na categoria de fertilizantes minerais simples ou mistos de composição silicática (fertilizantes silicáticos, FSi), desde que certificados como “Produto Novo”, conforme a legislação brasileira (BRASIL, 2016; Martins *et al.*, 2024).

Martins *et al.* (2024) propuseram o termo agrominerais silicáticos (AS) como uma categoria abrangente que inclui tanto os remineralizadores de solo, regulamentados pelo MAPA (BRASIL, 2016), quanto os fertilizantes minerais de silicato simples (FSi). Esses materiais contêm níveis significativos de Ca, Mg, K e, em alguns casos, P e micronutrientes, com liberação gradual desses elementos por meio de intemperismo, biointemperismo e interações solo-planta, ampliando as opções para uma agricultura mais resiliente e menos dependente de insumos importados.

Soma-se a isso o fato de o Brasil possuir uma grande geodiversidade, com uma ampla variedade de rochas com potencial para o uso de agrominerais silicáticos (ASi), o que incentiva pesquisas com diferentes litotipos. Além do benefício agronômico, o uso de pó de rocha representa um destino sustentável para descartes oriundos do setor de mineração que atendam às normativas.

Diante desse panorama, esta pesquisa investiga o potencial agronômico de rochas oriundas de duas pedreiras ativas no Rio Grande do Sul. As rochas, um riolito e um dacito, foram escolhidas por sua composição mineralógica rica em fases susceptíveis ao intemperismo, como fenocristais de plagioclásio e piroxênio, além de uma matriz afanítica, com baixa cristalinidade, rica em K. Na matriz, o K está presente em fases microcristalinas ou amorfas, mais susceptíveis à liberação de cátions do que fases minerais estáveis como os feldspatos alcalinos, notoriamente não reativos em solo. O presente estudo se distingue por cultivar plantas diretamente no pó de rocha, sem a adição de solo ou qualquer outro substrato, uma abordagem inovadora que enfatiza a interação entre os minerais presente no pó rochas, a matéria orgânica (adicionada via cama de aviário) e as raízes das plantas. Esta metodologia permite avaliar as transformações mineralógicas promovidas pelo biointemperismo, um processo mediado por microrganismos, e identificar as fases minerais que de fato se solubilizam e liberam nutrientes para as plantas, sem interferência da complexa mineralogia do solo, que pode ocultar as transformações nas análises mineralógicas por difração de raios X, por exemplo.

O processo de biointemperismo, mediado por microrganismos que formam biofilmes aderidos às superfícies minerais, concentra ácidos orgânicos e agentes quelantes, promovendo desagregação, corrosão e dissolução mineral em microescala. Esse conjunto de processos, recentemente enquadrado no conceito de *Enhanced Weathering* (Beerling *et al.*, 2020), é diretamente análogo às condições simuladas neste estudo, em que pós de rocha finamente moídos interagiram com raízes de *Zea mays* e matéria orgânica de cama de aviário.

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivos: (i) caracterizar mineralógica e texturalmente um riolito e um dacito do Grupo Serra Geral, com ênfase nas fases potencialmente reativas; (ii) avaliar as transformações mineralógicas ocorridas nesses pós de rocha em ensaios controlados com milho, conduzidos por 60 e 216 dias, em sistema sem solo; e (iii) evidenciar o papel do biointemperismo microbiano na dissolução de minerais e na liberação de nutrientes, integrando dados de DRX, FRX e MEV para discutir o potencial dessas rochas como agrominerais silicáticos em sistemas agrícolas sustentáveis.

2. Localização das Pedreiras

As rochas investigadas neste estudo foram coletadas em duas pedreiras localizadas no domínio da Bacia do Paraná, no Rio Grande do Sul, e pertencem ao vulcanismo Serra Geral, um evento magmático de grande extensão que integra a Província Mágmat

Paraná-Etendeka – esta última denominação reflete sua ocorrência em ambos os lados do Atlântico, no Brasil e na Namíbia (Freitas, 2009). Especificamente, a amostra P1 provém da Pedreira Gehlen, em Arvorezinha-RS, associada à Formação Caxias do Sul; enquanto a amostra P2 foi coletada na Pedreira Frare, em Anta Gorda-RS, na Formação Gramado, de acordo com o Horn *et al.* (2022).

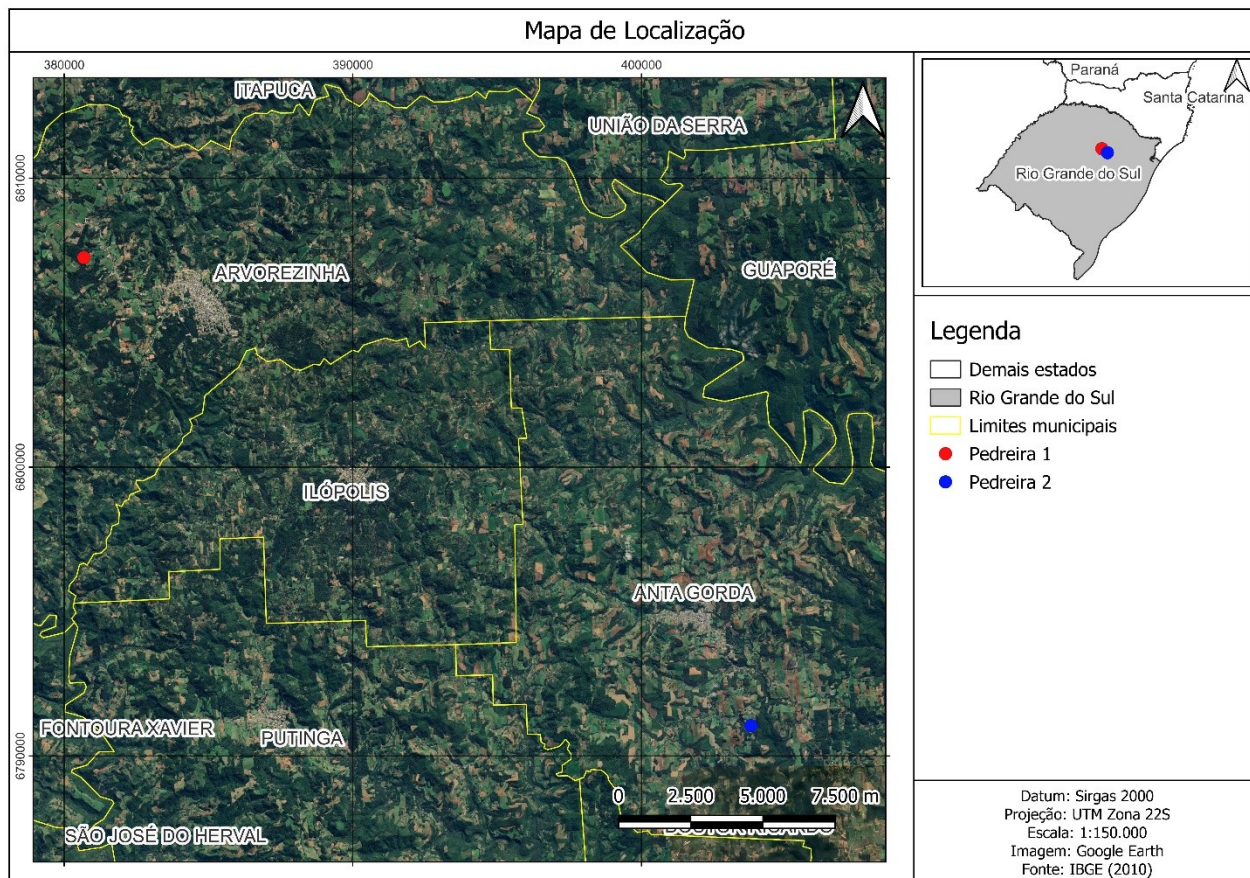


Figura 1. Mapa de localização das amostras P1, referente a Pedreira Gehlen, em Arvorezinha-RS (ponto vermelho) e P2, referente a Pedreira Frare, em Anta Gorda-RS (ponto azul) e a localização das amostras no Rio Grande do Sul.

Figure 1. Map showing the location of sample P1 from the Gehlen Quarry, in Arvorezinha, RS (red point), sample P2 from the Frare Quarry, in Anta Gorda, RS (blue point), and the position of the samples within Rio Grande do Sul.

3. Materiais e Métodos

Este estudo integrou caracterização petrográfica, análises mineralógicas e químicas, ensaios controlados com milho e análises pós-experimento para avaliar as transformações mineralógicas em pós de riolito (P1) e dacito (P2) do Grupo Serra Geral, em interação com matéria orgânica de cama de aviário e com o sistema radicular de *Zea mays*.

Neste artigo, o termo substrato refere-se especificamente à mistura de pó de rocha (P1 ou P2) com cama de aviário utilizada nos ensaios.

3.1. Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica sistemática acompanhou todas as etapas da pesquisa, subsidiando a definição do delineamento experimental, a escolha das técnicas analíticas (DRX, FRX e MEV) e a interpretação dos resultados.

3.2. Caracterização das rochas e do pó de rocha

O Quadro 1 sumariza os procedimentos analíticos aos quais cada tipo de amostra foi submetido.

Quadro 1. Sumário com as amostras P1, 1A, 1C, P2, 2B e 2C e todos os procedimentos aos quais cada uma delas foi submetida (petrografia, DRX com refinamento de Rietveld e microscopia eletrônica de varredura).

Chart 1. Summary of samples P1, 1A, 1C, P2, 2B and 2C, and all the procedures to which each of them was subjected (petrography, Rietveld Refinement XRD and scanning electron microscopy).

Amostra	Tipo de amostra	Petrografia	DRX e Rietveld	MEV
P1	Rocha do riolito da Pedreira Gehlen	X	X	
1A	Substrato de P1 + cama de aviário + milho após 60 dias de ensaio		X	X
1C	Substrato de P1 + cama de aviário + milho após 216 dias de ensaio		X	X
P2	Rocha do dacito da Pedreira Frare	X	X	
2B	Substrato P2 + cama de aviário + milho após 60 dias de ensaio		X	X
2C	Substrato de P2 + cama de aviário + milho após 216 dias de ensaio		X	X

3.2.1. Análise petrográfica

As lâminas delgadas foram confeccionadas no Laboratório de Laminação da Unisinos e analisadas em microscópio de luz polarizada (Leitz Laborlux 12), o que permitiu caracterizar a mineralogia, as texturas e eventuais alterações prévias nas rochas P1 e P2 (Quadro 1).

3.2.2. Análises por DRX e FRX

Para determinar a composição mineralógica e química de P1, P2 e das amostras pós-ensaio (1A, 1C, 2B, 2C), as amostras foram moídas a <30 µm em moinho Retsch RM 200 e analisadas por DRX e FRX (Quadro 1).

As análises de DRX foram realizadas no Instituto Tecnológico de Paleoceanografia e Mudanças Climáticas (itt OCEANEON/Unisinos). Os difratogramas foram obtidos em difratômetro Empyrean (Malvern PANalytical), configuração Bragg–Brentano, tubo de Cu (K α) operando a 40 kV e 40 mA, passo de 0,01° 2 θ e tempo de contagem de 960 s por passo. A identificação de fases e a quantificação mineralógica foram realizadas no software HighScore Plus 4.5, utilizando o refinamento de Rietveld com ajustes sucessivos de

background, fatores de escala, parâmetros globais, orientações preferenciais, células unitárias e parâmetros de forma de pico.

As análises de FRX foram realizadas em espectrômetro Epsilon 4 (PANalytical), com calibração Omnian (standardless, semi-quantitativa), ânodo de Ag e condições específicas de tensão e corrente para diferentes intervalos de Z, conforme rotina do laboratório.

3.2.3. Análise de argilominerais

A identificação dos argilominerais foi feita por DRX em amostras orientadas submetidas a três tratamentos (seca ao ar, glicolada e calcinada), preparados segundo Poppe *et al.* (2002), visando realçar as reflexões basais diagnósticas dos principais grupos de argilominerais.

3.3. Preparo do pó de rocha

Os pós de riolito (P1) e dacito (P2) foram coletados nas calhas de moagem das pedreiras de origem, secos a 60 °C por 72 h, peneirados em série granulométrica até 0,074 mm e homogeneizados. Para os ensaios, utilizou-se apenas a fração <2 mm, em conformidade com a Instrução Normativa nº 5/2016 (MAPA).

3.4. Ensaio

O ensaio foi conduzido de acordo com os protocolos estabelecidos por Silveira *et al.* (2019) para experimentos com remineralizadores e substratos para plantas. O ensaio, técnica experimental utilizada para avaliar a resposta biológica de plantas ou organismos a fatores ambientais, tratamentos químicos ou práticas agrícolas, é o método que permite testar a eficácia de novos fertilizantes, pesticidas, compostos biológicos e técnicas de manejo, além de avaliar o impacto ambiental de substâncias, incluindo estudos de fitotoxicidade, biofortificação, controle de pragas e nutrição de plantas (Lambers *et al.*, 2008).

O ensaio foi conduzido em vasos de 3 L, com durações de 60 e 216 dias, cultivando *Zea mays* diretamente em substrato composto por 3 kg de pó de riolito ou dacito e 13 g de cama de aviário, sem adição de solo.

Os vasos foram mantidos em área coberta, com irrigação diária de 100 mL de água filtrada (pH ~7). Três vasos foram preparados para cada pó de rocha (1A, 1B, 1C para P1; 2A, 2B, 2C para P2). Ao final de cada período, os vasos com o melhor desenvolvimento das plantas foram selecionados para a amostragem do substrato e para análises mineralógicas.

3.5. Caracterização do substrato pós-experimento e MEV

Após 60 e 216 dias, amostras do substrato foram coletadas para novas análises de DRX e MEV, a fim de avaliar alterações mineralógicas e a interação física entre partículas minerais, raízes e comunidades microbianas, com ênfase nos fungos micorrízicos (Quadro 1).

As amostras selecionadas, 1A (riolito da Pedreira Gehlen) e 2B (dacito da Pedreira Frare), com 60 dias de ensaio, e as amostras 1C (riolito da Pedreira Gehlen) e 2C (dacito

da Pedreira Frare), com 216 dias de ensaio, foram quarteadas, montadas em *stubs* de alumínio, metalizadas com ouro (40 nm) e analisadas em MEV EVO MA 15 (Zeiss) com detector de elétrons secundários.

4. Resultados e Discussões

4.1 Caracterização das rochas

4.1.1. Caracterização litoquímica das rochas

Em virtude da natureza vulcânica das rochas, que apresentam matriz afanítica abundante, a caracterização das amostras baseou-se em análise litoquímica. Este procedimento teve como objetivo classificar as rochas no diagrama *Total Alkali-Silica* (TAS), conforme proposto por Le Bas *et al.* (1986). Os dados litoquímicos obtidos para as amostras de riolito da Pedreira Gehlen (P1) e de dacito da Pedreira Frare (P2) encontram-se sintetizados na Tabela 1 e plotados no diagrama TAS da Figura 2. Cabe ressaltar que os dados da Pedreira Frare provêm de Ferreira (2022), devido à proximidade do ponto de amostragem.

Tabela 1. Composição química da rocha total e dos elementos maiores das rochas encontradas na Pedreira Gehlen (P1) e do dacito da Pedreira Frare (P2), sendo este último retirado de Ferreira (2022).

Table 1. Major-element whole-rock chemical composition of the rocks from the Gehlen Quarry (P1) and of dacite from the Frare Quarry (P2), the latter taken from Ferreira (2022).

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	L.O.I
Gehlen (P1)	71,25	0,42	12,19	3,79	0,12	0,59	2,38	2,53	3,62	0,13	2,88
Frare (P2)	66,90	0,97	12,97	5,81	0,08	1,21	3,10	2,87	4,09	0,27	1,19

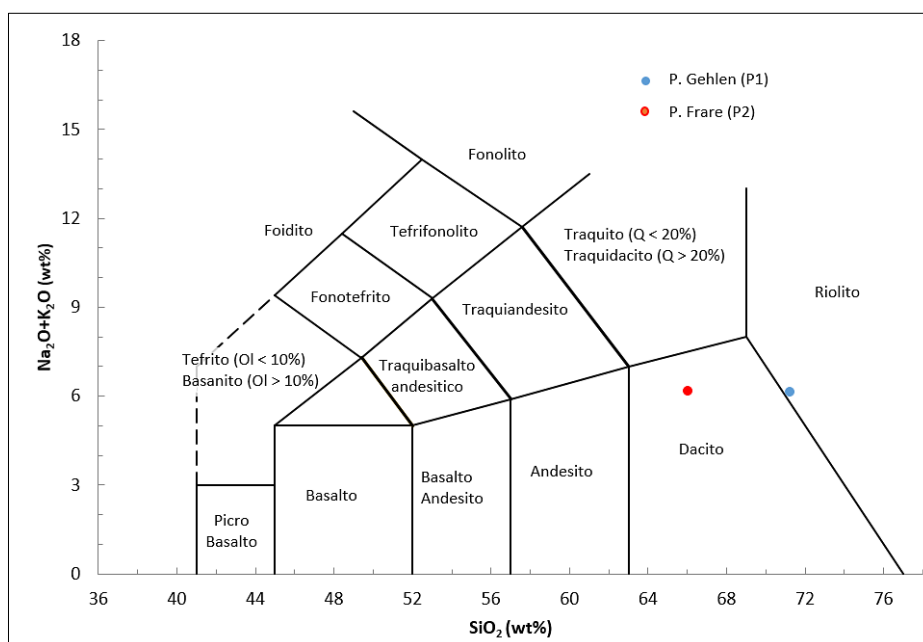


Figura 2. Diagrama de classificação Na₂O+K₂O versus SiO₂ (Le Bas *et al.*, 1986), para as amostras P1, referente a Pedreira Gehlen (ponto azul) e P2, referente a Pedreira Frare (ponto vermelho)

Figure 2. Classification diagram of Na₂O+K₂O versus SiO₂ (Le Bas *et al.*, 1986) for samples P1 from the Gehlen Quarry (blue point) and P2 from the Frare Quarry (red point).

4.1.2 Caracterização mineralógica das rochas

A amostra de riolito (P1), proveniente da Pedreira Gehlen, apresenta coloração castanha-clara em fratura fresca e é cortada por fraturas submilimétricas preenchidas por calcita. Sua textura é porfírica, com fenocristais esparsos e de granulação fina (0,4 a 1,0 mm), alongados a ovalados, de plagioclásio (esbranquiçado) e piroxênio (esverdeado), imersos em matriz afanítica que constitui mais de 90% da rocha.

Na lâmina delgada (Figura 3), confirma-se a textura porfírica. Os fenocristais de plagioclásio, de granulação fina (1,0 a 0,3 mm), predominantemente prismáticos, apresentam-se incolores a levemente turvos, com fraturas intraminerais que indicam resfriamento rápido. Observam-se maclas polissintéticas, forte zonação, contornos arredondados a irregulares e terminações em "cauda de andorinha". A difração de raios X indicou que se trata de variedades intermediárias a cálcicas, condizente com sua cristalização precoce.

Os microfenocristais máficos têm grão muito fino (< 0,5 mm), identificados por DRX como clinopiroxênio (augita), exibem coloração verde muito clara e pleocroísmo fraco. Estão parcialmente a totalmente substituídos ao longo de fraturas e bordas espessas por um agregado de minerais secundários de cor verde, diagnosticado pelo DRX como hornblenda e montmorilonita, além de minerais opacos.

A matriz, de natureza vítrea a microcristalina, é composta por cristalitos de plagioclásio e clinopiroxênio (este com raras clivagens prismáticas). O quartzo ocorre anédrico e incolor, preenchendo interstícios, o que sugere cristalização tardia. Também compõem a matriz esferulitos, agregados de microcristais fibrosos quartzo-feldspáticos, radiados e de baixa birrefringência, resultantes da devitrificação. A difração de raios X, com refinamento de Rietveld, apontou a presença de quartzo e sanidina (embora o ortoclásio possa estar presente).

Os minerais opacos presentes incluem magnetita, que confere leve magnetismo à amostra, e hematita, esta última identificada por filmes avermelhados associados ao clinopiroxênio e como "salpicos" dispersos na matriz.

Além desta mineralogia a análise de DRX apontou a presença de estilbita, uma zeólita comum nas rochas da Formação Caxias, do Grupo Serra Geral, como relatam Justo *et al.* (2013). Segundo estes autores, principalmente nos riolitos e dacitos do Grupo Serra Geral, a estilbita se forma como preenchimento de cavidades e fraturas resultantes de processos de alteração hidrotermal de baixa temperatura, muitas vezes associada a outros minerais do grupo das zeólitas, como heulandita, laumontita e mordenita. O reconhecimento dessa mineralização em setores do Rio Grande do Sul não apenas contribui para a compreensão da evolução pós-magmatismo dessas vulcânicas ácidas, como também indica potencial para aplicações agronômicas e ambientais, devido à significativa capacidade de adsorção das zeólitas naturais presentes nessas rochas.

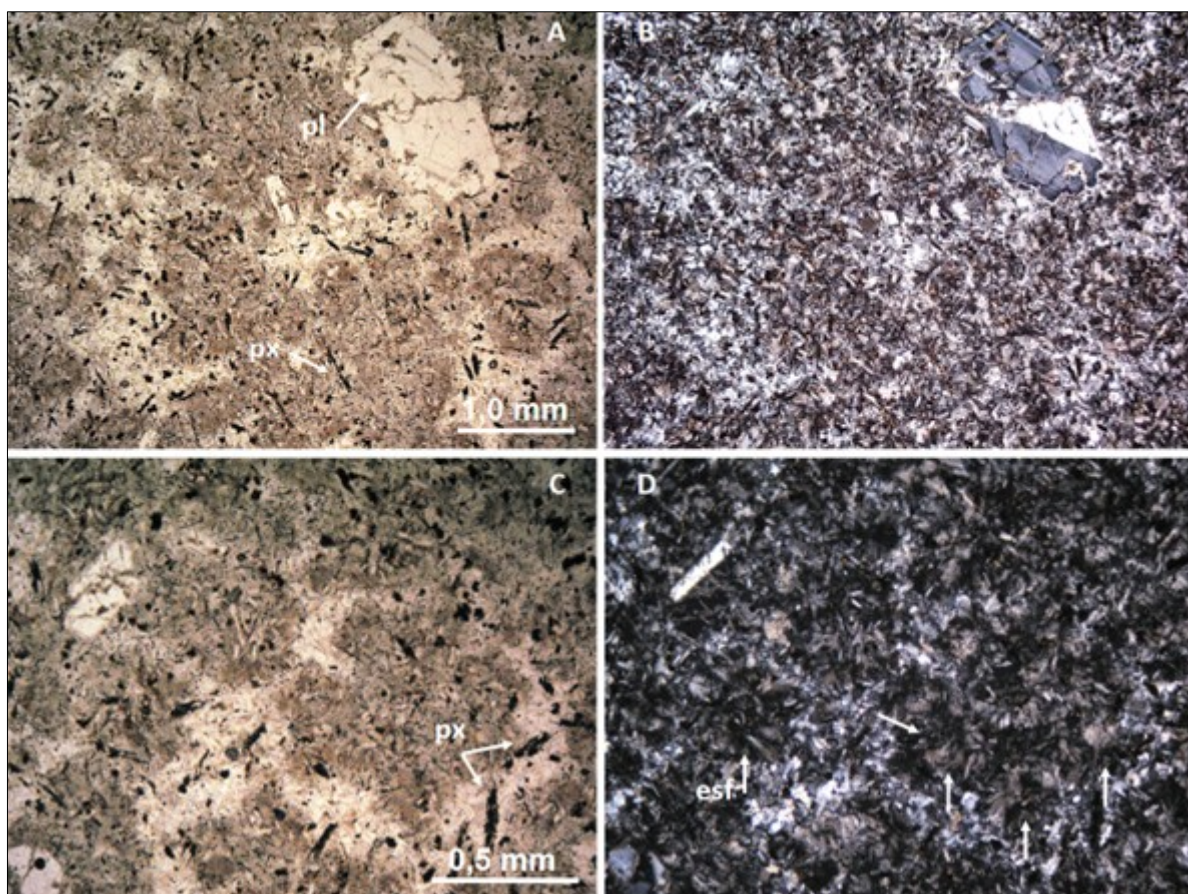


Figura 3. Fotomicrografias da lâmina P1. A) Fenocristais de plagioclásio e de piroxênio (px) acicular e oxidados em matriz esferulítica em luz polarizada plana. B) Fenocristal de plagioclásio com zonação marcada em luz polarizada cruzada, em aumento de 25X. C) Detalhe da matriz esferulítica, com intercrescimentos radiais quartzo-feldspáticos em luz polarizada plana. D) Esferulitos quartzo-feldspáticos marcados com setas brancas, em luz polarizada cruzada, com aumento de 40X.

Figure 3. Photomicrographs of thin section P1. A) Plagioclase and oxidized pyroxene (px) phenocrysts in a spherulitic groundmass under plane-polarized light. B) Plagioclase phenocryst with marked zoning under crossed polarizers, 25X magnification. C) Detail of the spherulitic groundmass, with radial quartz-feldspar intergrowths under plane-polarized light. D) Quartz-feldspar spherulites under crossed polarizers, 40× magnification.

A amostra de dacito P2, proveniente da Pedreira Frare, é uma rocha mesocrática de tonalidade cinza média com pontuações claras, apresentando a aparência clássica de "sal e pimenta". Sua textura é porfírica, exibindo raros fenocristais de plagioclásio e minerais máficos. Estes cristais são alongados, de granulação fina, com tamanhos entre 0,3 mm e 1,0 mm, imersos em uma matriz afanítica.

A análise em lâmina delgada confirmou a textura porfírica, com fenocristais de grão fino (< 1,0 mm) de plagioclásio e clinopiroxênio, predominantemente prismáticos. Esses fenocristais estão imersos em uma matriz afanítica vítrea, que representa 85% da rocha (Figura 4).

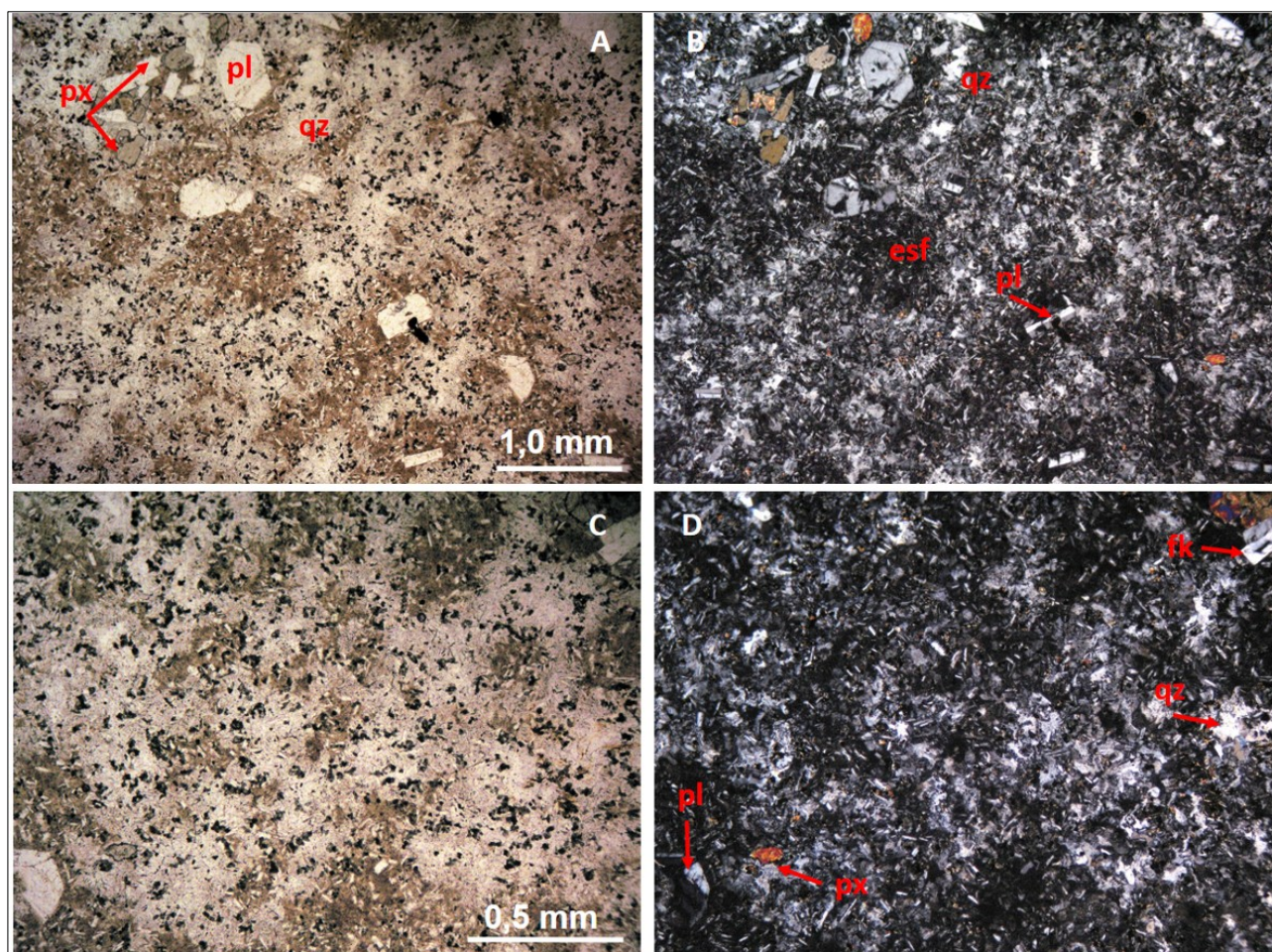


Figura 4. Fotomicrografias da lâmina P2. A) Cristais de plagioclásio, clinopiroxênio e quartzo em luz polarizada plana. B) Cristais de plagioclásio, quartzo e esferulitos em luz polarizada cruzada com aumento de 25X. C) Aumento de 40X com domínios vítreos em luz polarizada plana. D) Aumento de 40X com domínios vítreos em luz polarizada cruzada.

Figure 4. Photomicrographs of slide P2. A) 7X magnification, showing porphyritic texture with abundant matrix in LN. B) Isolated fine phenocrysts and dark, isotropic domains of glassy matrix in LP. C) Plagioclase, alkali feldspar, and quartz crystals in LN at 25X magnification. D) Plagioclase, alkali feldspar, and quartz crystals in LP at 25X magnification. E) 40X magnification with glassy domains in LN. F) Glassy domains in LP 40X magnification.

Os fenocristais de plagioclásio apresentam-se incolores e límpidos, com contatos definidos, porém frequentemente corroídos, indicativo de reações de reequilíbrio com a matriz. A zonação é frequente e bem marcada, com alguns cristais nucleando intercrescimentos esferulíticos. São comuns fraturas transversais ao maior alongamento, atribuídas ao resfriamento rápido. A presença de maclas polissintéticas é diagnóstica para este mineral, e a DRX corroborou a identificação de variedades intermediárias a cálcicas, consistente com sua cristalização precoce e com a zonação composicional (núcleos mais cálcicos e bordas mais sódicas).

Cristais de feldspato alcalino foram identificados, têm grão fino (inferior a 0,5 mm) com hábito prismático e a presença da macla de Carlsbad, o que, em conjunto com a análise de DRX, confirmou a presença de sanidina (ou ortoclásio).

Os fenocristais de clinopiroxênio têm grão muito fino (0,05 a 0,8 mm) e não exibem as clivagens prismáticas evidentes. Apresentam pleocroísmo de cor verde-pálido a incolor e, frequentemente, tornam-se opacos devido à oxidação. Mostram alteração para um

mineral verde ao longo de bordos e fraturas. A análise de DRX indicou que o piroxênio primário é a augita, e que os minerais secundários verdes tratam-se de hornblenda e montmorilonita.

Na matriz observa-se a presença de quartzo anédrico e incolor, com grãos de diâmetro inferior a 0,3 mm ocupando os interstícios, o que indica cristalização tardia. A análise pelo Método de Rietveld determinou que o percentual de quartzo na amostra é de 15%, abaixo, portanto, do conteúdo mínimo de quartzo de 20% para a classificação da rocha como dacito. Entretanto, o diagrama TAS (Figura 2) classifica a rocha como um dacito. Esta discrepância entre a classificação por DRX e a química deve-se aos domínios de sílica amorfa, pois a rocha apresenta abundantes resíduos vítreos. Estes resíduos vítreos da matriz formam esferulitos, constituídos de microcristais fibrosos e radiados de composição quartzo-feldspática, um produto da devitrificação, cuja composição foi corroborada pela DRX, como quartzo e sanidina (ou ortoclásio).

Os minerais opacos presentes incluem magnetita e hematita. Esta última é caracterizada principalmente por formar filmes avermelhados associados aos cristais de clinopiroxênio.

4.2 Ensaio

O desenvolvimento das plantas de milho foi monitorado em dois momentos: aos 60 e aos 216 dias após o plantio. Aproximadamente uma semana após o plantio, observou-se a emergência dos primeiros brotos na superfície de todos os vasos. Dez dias após o plantio, os brotos atingiram uma altura média de cerca de 5 cm, iniciando o processo de desdobramento foliar.

A primeira coleta de dados, aos 60 dias, revelou que a maioria das plantas apresentava entre cinco e seis folhas. Destacou-se o desenvolvimento do vaso 2B (amostra P2 - dacito), que continha o exemplar com a parte aérea mais alta, excedendo 30 cm de altura do caule. No vaso 2B, a maior raiz alcançou 12 cm, mas evidenciou um maior número de raízes laterais e ramificações (Figura 5A, 5B e 5C). Em contrapartida, o desenvolvimento radicular mais robusto foi observado no vaso 1A (amostra P1 - riolito), onde a maior raiz principal atingiu 16 cm de comprimento, exibindo ainda múltiplas ramificações secundárias.

Na análise final, aos 216 dias, foram observadas alterações morfológicas significativas. No vaso 1C (P1 - riolito): A planta desenvolveu um caule de aproximadamente 60 cm de altura. O sistema radicular estendeu-se por 12 cm, e foi registrado um marco significativo: o desenvolvimento de uma pequena espiga (Figura 5D, E e F). Já no vaso 2C (P2 – dacito) a planta apresentou a maior altura, com o caule variando entre 55 e 90 cm, além de uma maior densidade foliar. Seu sistema radicular foi o mais extenso de todo o experimento, alcançando 30 cm de comprimento (Figura 5G, H e I). Atribui-se este desenvolvimento robusto à maior soma de bases da amostra P2.



Figura 5. Desenvolvimento das plantas de milho aos 60 e 216 dias após o plantio. A) Parte aérea no vaso 2B (P2 – dacito) aos 60 dias. B) Sistema radicular no vaso 1A (P1 – riolito) aos 60 dias. C) Sistema radicular no vaso 2B (P2 – dacito) aos 60 dias, com raiz principal de 12 cm e maior número de raízes laterais e ramificações. D) Parte aérea no vaso 1C (P1 – riolito) aos 216 dias, com caule ~60 cm. E) Sistema radicular no vaso 1C (P1 – riolito), com extensão de 12 cm. F) Formação de pequena espiga no vaso 1C. G) Parte aérea no vaso 2C (P2 – dacito) aos 216 dias, com altura entre 55 e 90 cm e maior densidade foliar. H) Sistema radicular no vaso 2C, com comprimento de até 30 cm. I) Detalhe do desenvolvimento radicular no vaso 2C (P2 – dacito).

Figure 5. Development of maize plants at 60 and 216 days after planting. A) Aerial part in pot 2B (P2 – dacite) at 60 days. B) Root system in pot 1A (P1 – rhyolite) at 60 days. C) Root system in pot 2B (P2 – dacite) at 60 days, with a main root of 12 cm and a greater number of lateral roots and branches. D) Aerial part in pot 1C (P1 – rhyolite) at 216 days, with a stem ~60 cm. E) Root system in pot 1C (P1 – rhyolite), with an extension of 12 cm. F) Formation of a small cob in pot 1C. G) Aerial part in pot 2C (P2 – dacite) at 216 days, with a height between 55 and 90 cm and great leaf density. H) Root system in pot 2C, with a length of up to 30 cm. I) Detail of root development in pot 2C (P2 – dacite).

4.3 Análise mineralógica por difração de raios X e método de Rietveld

As amostras de pó de rocha das pedreiras Gehlen (P1 - riolito) e Frare (P2 - dacito) serviram de base de comparação para avaliar as transformações mineralógicas induzidas pela interação com microrganismos e raízes de milho nos ensaios de 60 e 216 dias. Foram selecionados para análise comparativa os pares P1 X 1A (riolito, 60 dias), P2 X 2B (dacito, 60 dias), P1 X 1C (riolito, 216 dias) e P2 X 2C (dacito, 216 dias). As alterações nas proporções dos minerais primários e secundários estão sumarizadas na Tabela 2.

Tabela 2: Análise mineralógica quantitativa pelo Método de Rietveld das amostras pesquisadas. Resultados expressos em %, onde P1 é o pó de riolito, P2 é o pó de dacito; 1A é o pó de riolito após o ensaio de 60 dias; 2B é o pó de dacito após 60 dias de ensaio; 1C é o pó de riolito após 216 dias de ensaio e 2C é o pó de dacito após 216 dias de ensaio.

Table 2. Quantitative mineralogical analysis of the samples studied by the Rietveld method. Results expressed as %, where P1 is the rhyolite powder, P2 is the dacite powder; 1A is the rhyolite powder after the 60-day assay; 2B is the trachyte powder after the 60-day assay; 1C is the rhyolite powder after the 216-day assay; and 2C is the dacite powder after the 216-day assay.

Amostra	Quartzo	Augita	Hematita	Montmorillonita	Plagioclásio	Sanidina	Hornblenda	Magnetita	Estilbita
Pó da rocha									
P1/riolito	22%	2%	1%	4%	50%	20%	1%	<1%	<1%
P2/dacito	15%	9%	1%	4%	47%	23%	1%	-	<1%
Pó da rocha após ensaio de 60 dias									
1A/riolito	30%	1%	<1%	1%	47%	20%	1%	-	-
2B/dacito	16%	7%	<1%	2%	50%	23%	<1%	1%	-
Pó da rocha após ensaio de 216 dias									
1C/riolito	6%	2%	1%	2%	75%	13%	1%	-	<1%
2C/dacito	20%	4%	1%	2%	44%	28%	2%	-	<1%

4.3.1 Análise comparativa aos 60 dias de ensaio

A comparação entre os difratogramas do par P1 x 1A (riolito da Pedreira Gehlen, respectivamente antes e depois do ensaio) indica transformações significativas após 60 dias. Observa-se uma redução na montmorillonita (4% → 1%), estilbita (<1% → ausente) e hornblenda (1% → ausente), sugerindo consumo dessas fases. O plagioclásio manteve-se estável (50%), enquanto O quartzo aumentou de 22% para 30%, refletindo um enriquecimento relativo devido ao consumo preferencial de fases mais reativas (montmorillonita, estilbita e hornblenda). Esse padrão é característico de processos de intemperismo seletivo, onde minerais resistentes concentram-se percentualmente à medida que fases susceptíveis são dissolvidas (Nesbitt; Young, 1984), indicando maior resistência ou concentração relativa frente às fases consumidas (Figura 6).

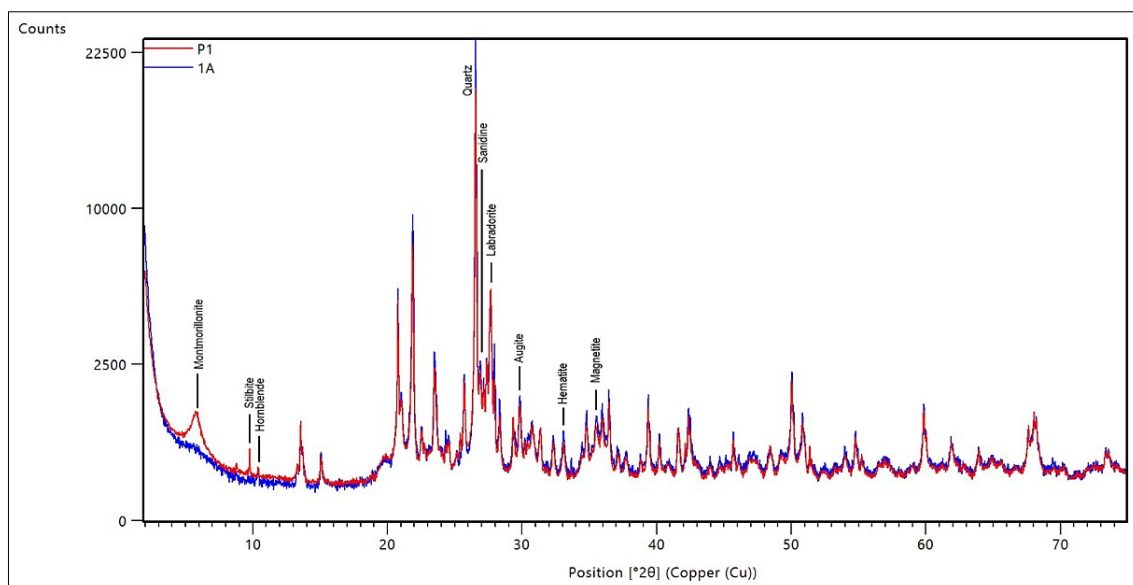


Figura 6. Difractograma comparando a mineralogia do riolito P1 (linha vermelha) antes do ensaio com a mineralogia do riolito 1A (linha azul) após o ensaio de 60 dias.

Figure 6. Diffractogram comparing the mineralogy of rhyolite P1 (red line) before the assay with the mineralogy of rhyolite 1A (blue line) after 60 days of assay.

A comparação entre os difratogramas do par P2 x 2B (dacito da Pedreira Frare respectivamente, antes e depois do ensaio) mostra que a assembleia mineral permanece dominada por plagioclásio (47% → 50%) e feldspato alcalino (23%), com uma redução moderada da augita (9% → 7%). A presença de hematita em menor teor (<1%) em 2B pode indicar consumo de fases ferromagnesianas. A estilbita, detectada em traço (<1%) na amostra original P2, tornou-se indetectável em 2B, assim como houve redução da montmorillonita (2%), reforçando a mobilidade desses minerais sob as condições do experimento (Figura 7).

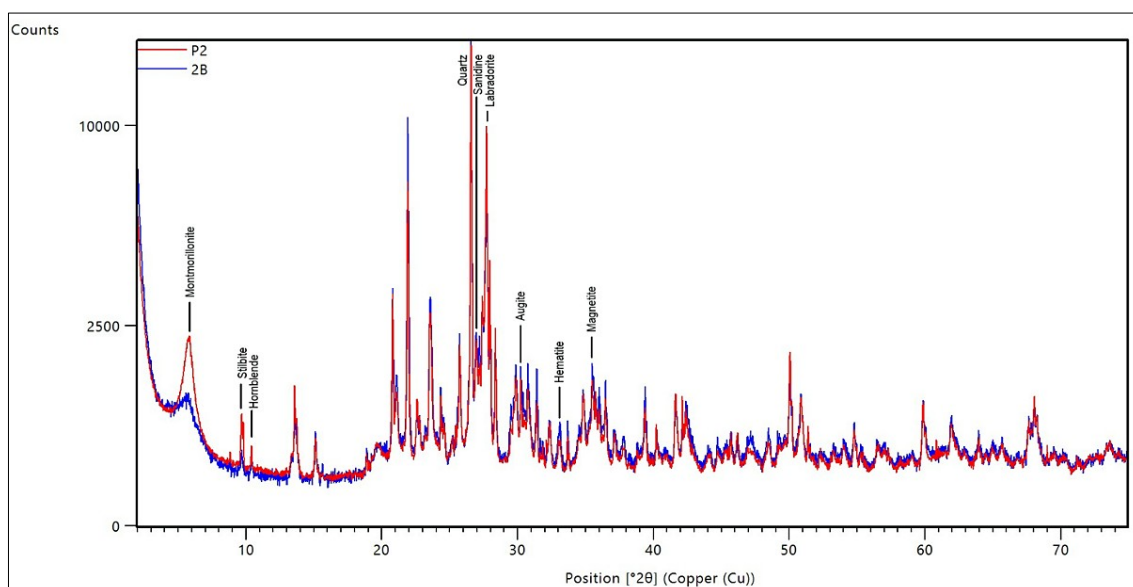


Figura 7. Difractograma comparando a mineralogia do dacito P2 (linha vermelha) antes do ensaio com a mineralogia do dacito 2B (linha azul) após o ensaio de 60 dias.

Figure 7. Diffractogram comparing the mineralogy of dacite P2 (red line) before the assay with the mineralogy of dacite 2B (blue line) after 60 days of assay.

4.3.2 Análise comparativa aos 216 dias de ensaio

A comparação entre os difratogramas do par P1 x 1C (riolito da Pedreira Gehlen, respectivamente antes e depois do ensaio) revela transformações mais acentuadas com o tempo prolongado, de 216 dias. Em comparação com P1, a amostra 1C apresenta um aumento expressivo de labradorita (50% → 75%) e reduções em sanidina/ortoclásio (20% → 9%) e montmorillonita (4% → 2%). O aumento expressivo de plagioclásio em 1C (50% → 75%) é intrigante e pode refletir: (i) concentração relativa por consumo preferencial de feldspato alcalino e fases secundárias; (ii) variabilidade amostral, dado o número limitado de réplicas (n=1); ou (iii) limitações do refinamento de Rietveld em matrizes com fases amorfas e microcristalinas. A ausência de evidências petrográficas ou de MEV para neoformação de plagioclásio favorece a hipótese de concentração relativa. Futuros estudos devem aumentar o número de réplicas e empregar análises químicas pontuais (e.g., EDS) para elucidar esse padrão.

Qualitativamente, observou-se uma clara diminuição na intensidade dos picos de estilbita e de hornblenda. A presença de hematita e a redistribuição dos feldspatos sugerem transformações estruturais parciais compatíveis com reações na interface mineral-matéria orgânica. Já a pequena quantidade de estilbita pode indicar a variabilidade amostral (Figura 8).

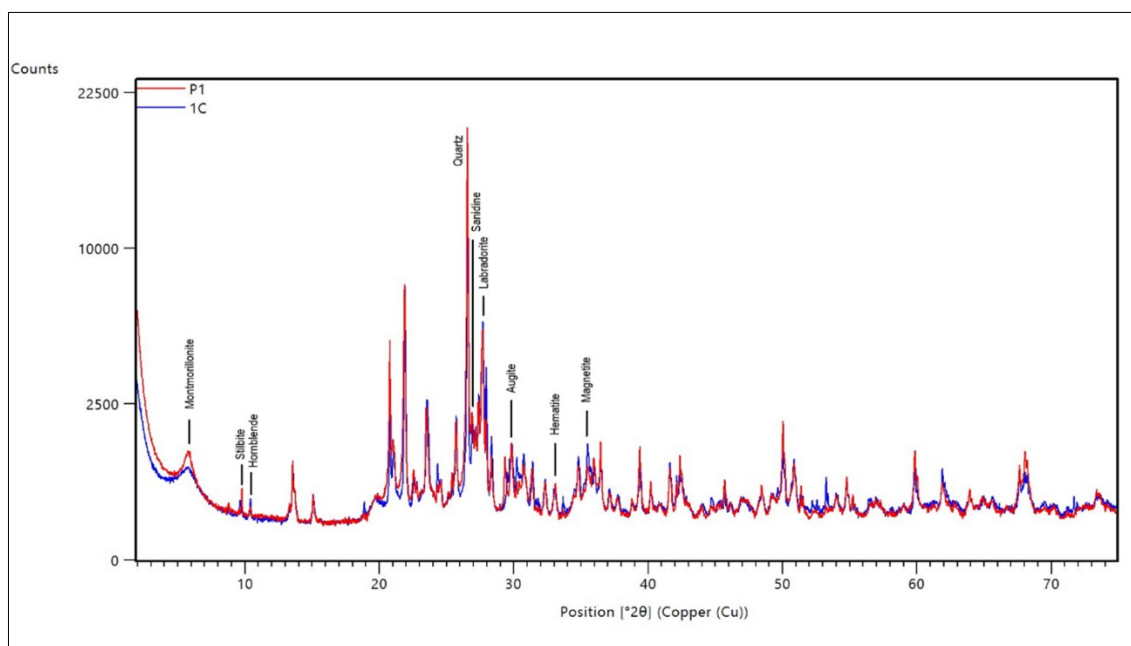


Figura 8. Difratograma comparando a mineralogia do riolito P1 (linha vermelha) antes do ensaio com a mineralogia do riolito 1C (linha azul) após o ensaio de 216 dias.

Figure 8. Diffractogram comparing the mineralogy of rhyolite P1 (red line) before the assay with the mineralogy of rhyolite 1C (blue line) after 216 days of assay.

A comparação entre os difratogramas do par P2 x 2C (dacito da Pedreira Frare respectivamente antes e depois do ensaio), exhibe as transformações mais expressivas. Houve redução na augita (9% → 4%) e na labradorita (47% → 44%), sugerindo alteração de minerais máficos e félsicos. O teor de feldspato alcalino manteve-se relativamente estável (23% → 20%). Contrastando com o consumo observado aos 60 dias, a estilbita foi detectada como traço (<1%) na amostra 2C, após seu desaparecimento em 2B, sugerindo neoformação em condições de biointemperismo avançado. Zeólitas como a estilbita

formam-se em ambientes com alta razão água/rocha, pH levemente alcalino e presença de cátions (Ca^{2+} , Na^+ , K^+) liberados pela dissolução de plagioclásio e piroxênio (Chipera & Apps, 2001). Sua capacidade de troca catiônica (CTC ~230 meq/100g) pode representar um mecanismo de retenção temporária de nutrientes no substrato, modulando a disponibilidade para as plantas (Ming, Mumpton, 1989). Estudos futuros devem investigar se essa neoformação é reprodutível e qual seu impacto na dinâmica nutricional de longo prazo.

Houve também redução da montmorillonita (4% → 2%). Estes dados sugerem um processo complexo de dissolução seletiva e neoformação (Figura 9).

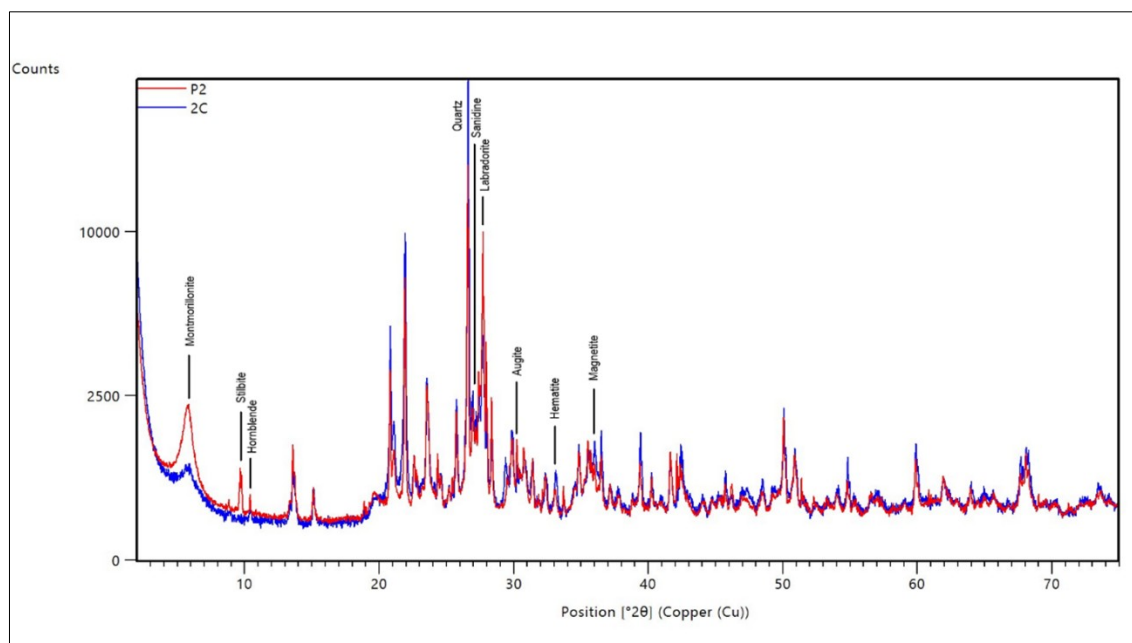


Figura 9. Difratoograma comparando a mineralogia do dacito P2 (linha vermelha) antes do ensaio com a mineralogia do dacito 2C (linha azul) após o ensaio de 216 dias.

Figure 9. Diffractogram comparing the mineralogy of dacite P2 (red line) before the assay with the mineralogy of dacite 2C (blue line) after 216 days of assay.

De modo geral, apesar do número restrito de repetições, que é de apenas uma amostra de cada variante, observou-se uma redução significativa na intensidade dos picos de minerais como montmorillonita, estilbita, hornblenda, augita e labradorita nas amostras incubadas no ensaio (1A, 2B, 1C, 2C) em comparação com as referências (P1, P2). Esta redução é interpretada como um indicativo de transformação ou consumo desses minerais pela atividade das plantas.

A montmorillonita, uma esmectita com estrutura expansível 2:1 e elevada capacidade de troca catiônica (CTC), é particularmente susceptível. Conforme descrito por Deer, Howie e Zussman (1992), à medida que o mineral perde cátions interlamelares para a solução do solo (disponibilizando-os para as plantas), sua estrutura torna-se desordenada (amorfa), levando à diminuição da intensidade do seu pico de difração.

Acredita-se que o consumo significativo observado, mesmo na curta duração de 60 dias, esteja diretamente correlacionado ao robusto desenvolvimento radicular do milho documentado nos vasos. O sistema radicular extenso e densamente ramificado aumenta drasticamente a área de contato e a exsudação de compostos orgânicos, acelerando os

processos de biointemperismo e facilitando a absorção de cátions liberados pela dissolução das fases minerais.

4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura foi empregada para investigar as transformações morfológicas nos grãos minerais e visualizar *in situ* a colonização microbiana e sua atividade nos substratos de riolito (amostras 1A e 1C) e dacito (amostras 2B e 2C) após 60 e 216 dias do ensaio com o pó das rochas, cama de aviário e *Zea mays*.

Esta observação foi fundamental, pois diversos autores, como Bonfante e Genre (2010) e Wilpiseski *et al.* (2019), relatam as interações benéficas entre plantas e fungos na simbiose micorrízica, destacando que mais de 90% das espécies vegetais terrestres incluem associações com microrganismos para a aquisição de nutrientes e a resistência a estresses. Os fungos micorrízicos exploram substratos minerais e orgânicos, estabelecem interfaces especializadas com as raízes das plantas e promovem trocas intensas de nutrientes por meio de transportadores específicos, remodelando tanto o metabolismo quanto a estrutura celular do hospedeiro.

Os resultados do ensaio, de maneira geral, além de revelarem uma nítida diferença na abundância e na diversidade microbiana entre os dois tempos de experimento, mostram que essas interações são profundas. Aos 60 dias, não foi evidenciada uma presença significativa de microrganismos ou de bioassinaturas morfológicas resultantes deste tipo de atividade. Aos 216 dias, no entanto, observou-se um desenvolvimento e diversificação da comunidade microbiana, os quais estavam diretamente associados a alterações morfológicas evidentes nas superfícies dos grãos minerais, indicativas de processos de biointemperismo.

As amostras foram observadas em aumento próximo de 10.000X, pois esse aumento é compatível com a observação dos fungos, micorrízicos ou saprofílicos, onde o diâmetro das hifas varia entre 2 e 20 μm , muito superior ao diâmetro das raízes, que correspondem a valores superiores a 300 μm (Berude *et al.*, 2015).

4.4.1 Resultados do MEV nas amostras 1A e 2B com 60 dias de ensaio

Nas amostras 1A e 2B (respectivamente pós das rochas riolito P1 e dacito P2 + cama de aviário + milho) com 60 dias de ensaio se observou uma biota insipiente e que os minerais e fragmentos da rocha moída se apresentam em fragmentos com contornos angulosos. Na amostra 1A (riolito), foi constatada a presença de alguma microbiota. Foram observadas estruturas microbianas com morfologia compatível com bactérias bacilares (*bacilli-like*), além de filamentos interpretados como hifas fúngicas ou bactérias do tipo espirilo, além de assinatura morfológica atribuída à passagem de microrganismo sobre o substrato (Figura 10A).

Já na amostra 2B (dacito) foi possível observar a presença de argilominerais na forma de flocos, raras bactérias ou esporos de fungos, à semelhança da amostra 1A, os fragmentos mantêm seus contornos (Figura 10B).

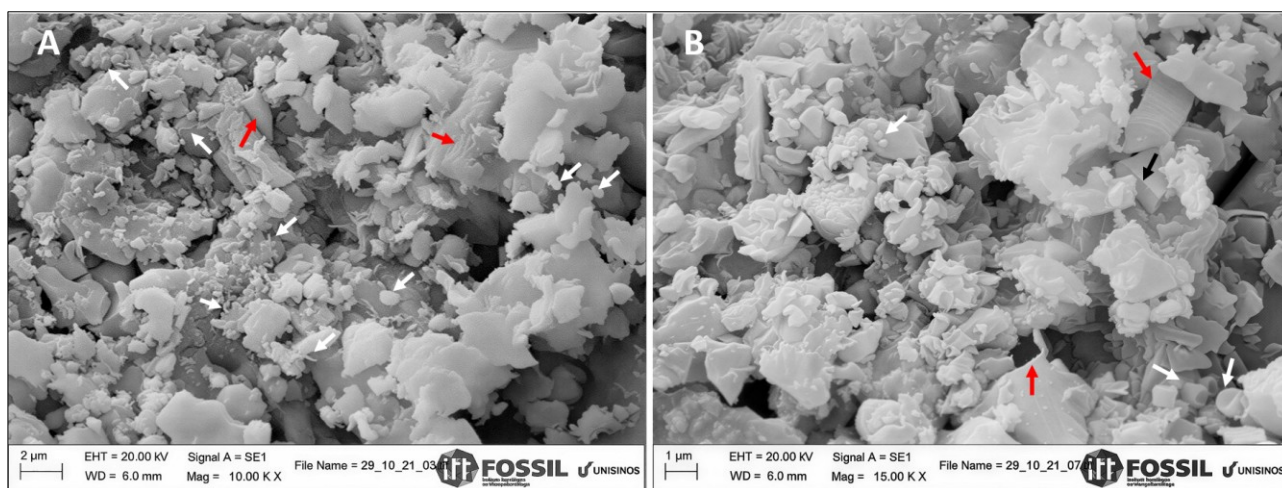


Figura 10. Imagens WDS da A) Amostra 1A, com 60 dias de ensaio, em aumento de 10.000X, onde foram observadas bactérias (setas brancas), filamentos (setas brancas), minerais e fragmentos de rocha com a morfologia preservada (setas vermelhas), além de argilominerais em abundância (flocos); B) Amostra 2B, com 60 dias de ensaio, em aumento de 15.000X, onde foram observadas bactérias ou esporos (setas brancas), a minerais e fragmentos de rocha com a morfologia preservada (setas vermelhas), além de argilominerais em abundância (flocos);

Figure 10. WDS images of A) Sample 1A after 60 days of assay, at 10,000× magnification, where bacteria (white arrows), filaments (white arrows), minerals, and rock fragments with preserved morphology (red arrows) were observed, as well as abundant clay minerals (flakes); B) Sample 2B after 60 days of assay, at 15,000× magnification, where bacteria or spores (white arrows), minerals and rock fragments with preserved morphology (red arrows), and abundant clay minerals (flakes) were observed.

4.4.2 Resultados do MEV nas amostras 1C e 2C de 216 dias de ensaio

Nas amostras 1C e 2C, após 216 dias de ensaio, foi observada uma abundante microbiota, além de inúmeras feições de corrosão nos fragmentos que compõem o pó das rochas moídas.

Na amostra 1C (pó de riolito P1 + cama de aviário + milho, por 216 dias) foi possível reconhecer diferentes grupos microbianos presentes, onde foram identificadas bactérias (com células até 5 µm, arredondadas e, em geral isoladas); os actinomicetos, identificadas por formarem filamento semelhantes a fungos, porém com espessura menor e segmentados (como um colar de contas); e filamentos de fungos, que tanto podem ser micorrizas como fungos saprofíticos, associados a decomposição da matéria orgânico (Figura 11). A Figura 11A evidencia a estrutura de alguns grãos minerais, na qual a clivagem se destaca, e é possível perceber que os contornos dos grãos minerais estão, em geral, suavizados, com arestas arredondadas, sugerindo a ação do biointemperismo. Também é evidente a presença de biofilmes de substâncias poliméricas extracelulares (EPS), que são comunidades microbianas imersas em uma matriz autoproduzida, que cobre o substrato, conferindo um aspecto gelatinoso à imagem (Figura 11B).

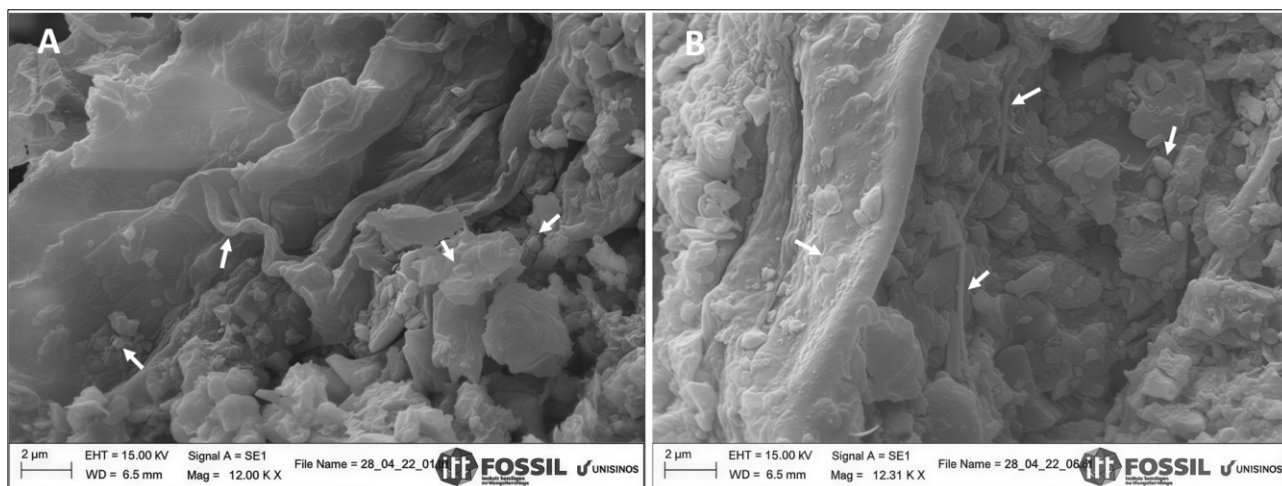


Figura 11. Imagens WDS da amostra 1C, com 216 dias de ensaio, A) Aumento de 12.000X, onde podem ser observados filamentos (fúngicos?), estruturas cilíndricas e arredondadas, biofilme EPS, a suavização dos contornos das clivagens minerais, além de alguns argilominerais; B) Aumento de 12.310X onde se destaca a presença de bactérias (pequenas esferas), filamentos (fúngicos?) e abundante biofilme EPS.

Figure 11. WDS images of sample 1C after 216 days of assay. A) At 12,000× magnification, where filaments (fungal?), cylindrical and rounded structures, EPS biofilm, smoothing of mineral cleavage contours, and some clay minerals can be observed; B) At 12,310× magnification, highlighting the presence of bacteria (small spheres), filaments (fungal?), and abundant EPS biofilm.

Na amostra 2C (milho + pó de dacito P1 + cama de aviário, por 216 dias), em contraste com as amostras de 60 dias, verificou-se maior abundância e diversidade de microrganismos e de feições de intemperismo. A comunidade é composta por hifas de actinomicetos, com células ovaladas a cilíndricas, apresentando depressão central, encontradas tanto individualmente quanto formando cordões e colônias. Hifas fúngicas, reconhecíveis pela espessura mais acentuada, também estão presentes. O intemperismo resultante da ação desses microrganismos é evidente, caracterizado pelo arredondamento dos vértices e das arestas dos grãos e, em alguns casos, pela formação de bordas rendilhadas. Em detalhe (Figura 12B), são reveladas estruturas nas quais fungos possivelmente parasitam outros fungos, um comportamento típico de determinados fungos biocontroladores.

Os resultados obtidos convergem com a literatura, Bonfante & Genre, (2010) e Wilpieszski *et al.* (2019) destacam o papel dos microrganismos no biointemperismo e na dinâmica dos nutrientes. Gorbushina (2009) expõe que microrganismos fúngicos produzem substâncias poliméricas extracelulares (EPS) que lhes permitem formar biofilmes complexos e resistentes sobre superfícies minerais, desempenhando um papel central tanto nos processos de intemperismo quanto na formação de solos. Esses biofilmes intensificam a dissolução dos minerais por meio de ações mecânicas, relacionadas à pressão exercida por hifas e microcolônias, e por vias químicas, como a liberação de ácidos orgânicos e oxalatos e a síntese de pigmentos que interagem com os elementos constituintes dos minerais, conforme ilustrado nas Figuras 11 e 12. As EPS cumprem ainda diversas funções ecológicas, incluindo a proteção dos microrganismos frente a condições ambientais adversas, a facilitação da adesão às partículas minerais, o armazenamento de nutrientes e a retenção de água, o que, em última instância, favorece a produtividade vegetal. Experimentos como os de Wilpieszski *et al.* (2019) confirmam que comunidades microbianas associadas a agregados minerais são críticas para a dinâmica de biociclagem em sistemas agrícolas sustentáveis.

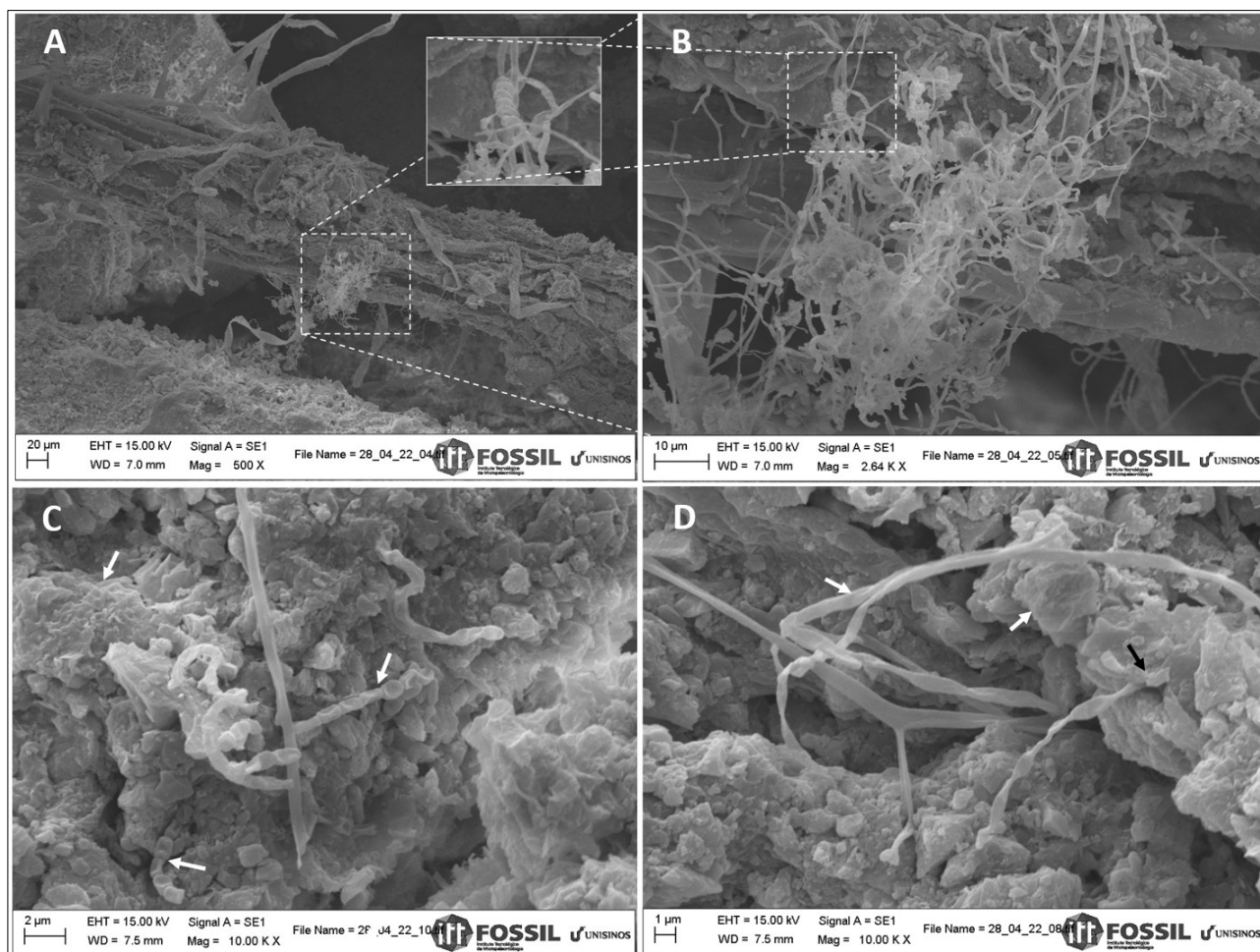


Figura 12. Imagens WDS da amostra 2C, com 216 dias de ensaio A) aumento de 500X e B) com aumento de 2640 X onde é clara a abundância de microrganismos cobrindo os minerais, no detalhe, o parasitismo entre dois fungos; C) aumento de 10.000X onde se observa a redução na presença de argilominerais e abundância de bactérias e hifas de actinomiceto (setas brancas); D) aumento de 10.000X onde os filamentos (seta branca) estão penetrando os minerais (seta preta) e há feições de dissolução sobre a superfície dos minerais (seta branca à direita).

Figure 12. WDS images of sample 2C after 216 days of assay. A) At 500× magnification and B) at 2,640× magnification, where the abundance of microorganisms covering the minerals is evident; in detail, parasitism between two fungi; C) at 10,000× magnification, showing a reduction in the presence of clay minerals and an abundance of bacteria and actinomycete hyphae (white arrows); D) at 10,000× magnification, where filaments (white arrow) are penetrating the minerals (black arrow), and dissolution features are present on the mineral surfaces (white arrow on the right).

5. Discussão

A integração entre os resultados obtidos com os pós de riolito (P1) e dacito (P2) do Grupo Serra Geral e a literatura evidenciam que esses litotipos reúnem características mineralógicas e texturais compatíveis com o uso como agrominerais silicáticos em ambientes tropicais. Em particular, a presença de plagioclásio cálcico a intermediário, clinopiroxênio (augita), hornblenda, montmorillonita, zeólitas (estilbita) e matriz devitrificada rica em K define um conjunto de fases potencialmente reativas, capazes de liberar cátions

essenciais sob condições de biointemperismo mediado por raízes e microrganismos, tal como discutido em estudos clássicos de intemperismo de silicatos (Deer; Howie; Zussman, 1992; Nesbitt; Young, 1984; Sparks, 1987).

5.1. Biointemperismo e transformações mineralógicas

Os resultados de DRX quantitativa mostram que, após 60 e 216 dias de ensaio, houve redução sistemática de minerais como montmorillonita, hornblenda, estilbita, augita e, em alguns casos, labradorita nas amostras submetidas ao biensaio (1A, 2B, 1C, 2C), em comparação com os pós de rocha originais (P1, P2). Essa diminuição é interpretada como indicativa de dissolução seletiva e/ou de transformação dessas fases, em resposta à interação com exsudatos radiculares e matéria orgânica da cama de aviário, em um sistema com alta atividade biológica, como também discutem Anbeek (1992) e Israeli & Emmanuel (2018) ao tratar da aceleração do intemperismo por processos biogênicos. Ao mesmo tempo, minerais mais resistentes, como o quartzo, aparecem enriquecidos em termos relativos, o que não implica neoformação, mas sim concentração de fases estáveis à medida que componentes mais reativos são consumidos, comportamento típico de perfis de intemperismo de silicatos (Nesbitt; Young, 1984). Entretanto, no riolito (P1), após um enriquecimento relativo em quartzo aos 60 dias (de 22 para 30%), observa-se aos 216 dias uma forte redução desse percentual (de 30 para 6%), coerente com a dissolução progressiva de formas de sílica mais reativas (quartzo micro/criptocristalino e matriz devitrificada) em um sistema de alta atividade biológica. Biofilmes e comunidades microbianas são capazes de atacar ativamente superfícies de quartzo e vidro, gerando pites, depressões e diminuição do tamanho de grão, tanto em vidro vulcânico quanto em quartzo cristalino, conforme descrevem Brehm *et al.* (2005). Além disso, de acordo com Vandevivere *et al.* (1994), ácidos orgânicos e exsudatos microbianos podem aumentar significativamente a dissolução de quartzo e outros silicatos, mesmo em pH próximo da neutralidade. Em paralelo, a rizosfera de gramíneas mobiliza Si de minerais primários por meio da liberação de carboxilatos e outros exsudatos, favorecendo a dissolução de silicatos e o acúmulo de Si nas plantas (Cornelis & Delvaux, 2016). Nesse contexto, a queda acentuada de quartzo em P1 após 216 dias é interpretada como resultado do biointemperismo da sílica menos cristalina, sob forte demanda de Si pelo milho, mais do que de qualquer processo de neoformação ou viés analítico.

A montmorillonita, esmectita expansiva de elevada capacidade de troca catiônica, destaca-se como uma das fases mais sensíveis, apresentando redução expressiva já aos 60 dias, especialmente no par P1–1A. À medida que o mineral perde cátions interlamelares (K, Ca, Mg) para a solução, sua estrutura tende a tornar-se parcialmente desordenada e menos cristalina, com consequente diminuição da intensidade dos picos de difração (Deer; Howie; Zussman, 1992). Esse comportamento é coerente com o que descreve a literatura sobre intemperismo de esmectitas e sugere que uma parte significativa dos nutrientes liberados no sistema está associada à dissolução de argilominerais e zeólitas, que respondem rapidamente às mudanças químicas na rizosfera (Bish; Post, 1993). Em contraste, a augita mostra dissolução progressiva (P2: 9%→7%→4%), consistente com uma cinética de dissolução mais lenta dos piroxênios (Brantley, 2008).

No riolito (P1), o comportamento do plagioclásio merece destaque: em 1C, o conteúdo de plagioclásio aumenta de 50% para 75%, enquanto sanidina/ortoclásio e montmorillonita diminuem. Esse aumento pode ser atribuído a um enriquecimento relativo causado pelo consumo de fases secundárias e feldspatos alcalinos, aliado a limitações analíticas e à heterogeneidade do material, e não à neoformação de plagioclásio, tal como

já apontado em estudos de quantificação mineralógica em matrizes com alto teor amorfo (Bish & Post, 1993; Poppe *et al.*, 2002). Em sistemas com frações amorfas abundantes e matriz microcristalina, o refinamento de Rietveld pode superestimar a fração de fases cristalinas dominantes, o que requer cautela na interpretação quantitativa detalhada, especialmente com um número limitado de réplicas.

No dacito (P2), as transformações mais marcantes ocorrem em augita, labradorita, montmorillonita e estilbita, com redução progressiva da augita (9% → 7% → 4%) e da montmorillonita (4% → 2%) entre as amostras P2, 2B e 2C. Em contraste, o teor de feldspato alcalino permanece relativamente estável, confirmando sua baixa reatividade em comparação com fases máficas e secundárias, em consonância com a reatividade diferencial dos silicatos descrita por Brantley (2008) e por Deer, Howie e Zussman (1992). Os picos de estilbita em traços em 2C, após ter se tornado indetectável em 2B, sugerem um processo de neoformação em ambiente de elevada atividade de solução e abundância de cátions liberados pela dissolução de plagioclásio e piroxênio, compatível com a formação secundária de zeólitas em sistemas de intemperismo avançado (Justo *et al.*, 2013; Bish & Post, 1993).

Essas diferenças refletem a reatividade intrínseca de cada fase: argilominerais e zeólitas respondem rapidamente a perturbações químicas da rizosfera, enquanto silicatos ferromagnesianos exigem mais tempo para a dissolução congruente. Isso tem implicações práticas: os agrominerais silicáticos fornecem pulsos iniciais rápidos (via fases secundárias) e liberação sustentada de longo prazo (via minerais primários).

5.2. Papel da matriz devitrificada e da fração microcristalina rica em K

Ao se considerar o nutriente K, o principal mineral portador de K nas rochas estudadas é o feldspato alcalino. Entretanto, de acordo com Sparks (1987), o K presente nos feldspatos alcalinos é estrutural e, por isso, não está disponível para as plantas. Porém, os resultados obtidos indicam que os minerais portadores de K solubilizados pertencem sobretudo à fração microcristalina gerada por processos de devitrificação, como os intercrescimentos esferulíticos. Esse padrão é consistente com Anbeek (1992), que, ao comparar feldspatos frescos e intemperizados, demonstrou que fases microcristalinas exibem maior reatividade cinética devido à maior área superficial específica, à elevada densidade de defeitos cristalinos e ao maior número de interfaces reativas, resultando em taxas mais altas de dissolução e de intemperismo químico em relação a agregados mais cristalinos ou de granulação mais grossa, mesmo quando a composição mineralógica é semelhante. De forma convergente, Israeli & Emmanuel (2018) ressaltam que minerais de menor tamanho de grão e baixo grau de cristalinidade são menos estáveis frente ao intemperismo e à dissolução química, pois rochas mais finamente granuladas apresentam maior densidade de contornos de grão, ampliando a área reativa associada às bordas e levando a taxas de dissolução superiores às observadas em agregados mais cristalinos.

A composição litoquímica de P1 e P2 demonstra que ambas as rochas apresentam teores relevantes de K_2O , CaO e MgO , com o dacito exibindo maior soma de bases ($CaO+MgO+K_2O$), o que se reflete no desempenho superior das plantas nos vasos associados a P2. Entretanto, os resultados indicam que a principal fonte de K disponível não é os feldspatos alcalinos bem cristalizados, mas sim a fração microcristalina e amorfa da matriz devitrificada, constituída por esferulitos quartzo-feldspáticos e domínios vítreos parcialmente recristalizados. Essa fração apresenta maior área de superfície específica, elevada densidade de defeitos cristalinos e abundância de interfaces reativas, o que aumenta sua suscetibilidade à dissolução química em comparação com cristais de sanidina

ou ortoclásio bem desenvolvidos, conforme discutido em estudos de dissolução cinética de silicatos (Anbeek, 1992; Brantley, 2008).

A dissolução preferencial da matriz devitrificada é corroborada pela combinação de DRX e observações petrográficas e de MEV, que mostram fragmentos do pó de rocha sendo progressivamente atacados, com suavização de contornos e de clivagens. Esse padrão está em consonância com trabalhos que apontam maior reatividade de fases microcristalinas e de menor tamanho de grão em relação aos agregados cristalinos, mesmo quando a composição mineralógica é semelhante (Anbeek, 1992; Israeli & Emmanuel, 2018). Do ponto de vista agrônomo, isso implica que rochas vulcânicas ácidas com matriz devitrificada fina podem funcionar como fontes importantes de K e de outros nutrientes em horizontes de tempo compatíveis com ciclos de cultivo, desde que o material seja finamente moído, como no presente estudo.

5.3. Comunidades microbianas, biofilmes e feições de corrosão mineral

As análises de MEV complementam os dados de DRX ao revelar, em microescala, a ação conjunta de raízes e comunidades microbianas na modificação das superfícies minerais ao longo do tempo. Nas amostras com 60 dias (1A e 2B), observa-se uma biota ainda incipiente, com presença de bactérias bacilares, esporos raros e filamentos isolados, enquanto os fragmentos de rocha mantêm contornos predominantemente angulosos e morfologia pouco alterada. Após 216 dias (1C e 2C), há um aumento expressivo na abundância e diversidade de microrganismos, incluindo actinomicetos, hifas fúngicas e estruturas compatíveis com fungos micorrízicos, além da formação de extensos biofilmes de substâncias poliméricas extracelulares (EPS) recobrando os grãos minerais, em consonância com descrições de biofilmes em ambientes minerais (Gorbushina, 2009; Wilpiseski *et al.*, 2019).

Esses biofilmes e redes de hifas estão diretamente associados a feições diagnósticas de biointemperismo, como arredondamento de vértices, bordas rendilhadas, microfraturas ampliadas e evidências de penetração de filamentos no interior dos grãos. As imagens de 2C, em particular, mostram grãos intensamente recobertos por microrganismos e estruturas interpretadas como parasitismo entre fungos, sugerindo uma comunidade complexa e funcionalmente diversa atuando sobre o substrato mineral. A concordância entre a redução, ao longo do tempo, de minerais reativos (montmorillonita, estilbita, hornblenda, augita, labradorita) e o aumento de biofilmes e hifas observados ao MEV reforça a interpretação de que essas fases atuam como *hotspots* de biointemperismo na interface microrganismo–mineral (Bonfante & Genre, 2010; Wilpiseski *et al.*, 2019).

A literatura em microbiologia do solo descreve que fungos micorrízicos e actinomicetos são particularmente eficientes na exploração de substratos minerais, pela combinação de ações mecânicas (pressão de hifas, colonização de poros e fraturas) e químicas (liberação de ácidos orgânicos, ligantes e exsudatos complexantes) na interface raiz–solo (Lambers & Chapin III; Pons, 2008; Bonfante & Genre, 2010). No contexto deste estudo, a presença de cama de aviário fornece carbono lábil e nutrientes que sustentam o desenvolvimento da microbiota, enquanto os exsudatos radiculares de *Zea mays* contribuem para a acidificação local e complexação de cátions, favorecendo a dissolução seletiva das fases minerais reativas. Assim, o sistema experimental adotado reproduz, em escala reduzida, condições análogas às de *Enhanced Weathering* em solos agrícolas, nas quais o intemperismo de silicatos é acelerado pela atividade biológica (Beerling *et al.*, 2020).

5.4. Desempenho agrônômico e diferenças entre riolito e dacito

O desenvolvimento das plantas de milho ao longo de 60 e 216 dias evidencia que ambos os pós de rocha suportam o crescimento vegetal em ausência de solo, mas com desempenho diferenciado entre os litotipos. Aos 60 dias, o vaso 2B (dacito) apresentou a maior altura da parte aérea (>30 cm), enquanto o vaso 1A (riolito) exibiu o sistema radicular mais robusto em termos de comprimento e ramificações. Aos 216 dias, a planta cultivada em 2C atingiu altura entre 55 e 90 cm e raízes de até 30 cm, com maior densidade foliar, ao passo que 1C apresentou caule de ~60 cm, raízes de 12 cm e formação de espiga, indicando que ambos os materiais foram capazes de sustentar os ciclos vegetativo e reprodutivo, embora com padrões morfológicos distintos.

Essas diferenças podem estar relacionadas à maior soma de bases de P2 (dacito) e à maior proporção de fases máficas reativas (augita, hornblenda) no dacito, que contribuem com Ca, Mg e Fe de forma contínua ao longo do experimento (Sparks, 1987; Brantley, 2008). O riolito, por sua vez, depende mais intensamente da dissolução da matriz devitrificada rica em K e da transformação de fases secundárias, como montmorillonita e estilbita, o que pode resultar em liberação relativamente mais gradual ou em pulsos associados à evolução da microbiota. Assim, do ponto de vista agrônômico, o dacito tende a se comportar como um ASi com aporte mais vigoroso de bases e maior estímulo à biomassa aérea e radicular, enquanto o riolito atua como fonte relevante de K e outros nutrientes, modulada pela devitrificação da matriz e pelo biointemperismo microbiano.

É importante ressaltar que, apesar da coerência entre mineralogia, desempenho vegetal e observações de MEV, o experimento contou com um número limitado de réplicas ($n = 1$ por tratamento/tempo para as análises mineralógicas) e não incluiu análises químicas do tecido vegetal. Isso impede, neste momento, a quantificação direta dos fluxos de K, Ca, Mg, P e micronutrientes das rochas para as plantas e limita a possibilidade de estabelecer relações quantitativas robustas entre a dissolução mineral e a nutrição vegetal, como recomendam abordagens de balanço de massa em estudos de intemperismo acelerado (Beerling *et al.*, 2020). Estudos futuros devem incorporar análises de nutrientes na parte aérea e nas raízes, aumentar o número de repetições e empregar vasos fechados, de modo a permitir balanços de massa mais completos e avaliação de perdas por lixiviação.

5.5. Implicações para o uso de agrominerais silicáticos e perspectivas

Os resultados obtidos reforçam a ideia de que rochas vulcânicas ácidas do Grupo Serra Geral podem atuar como fontes seguras e eficazes de nutrientes essenciais quando aplicadas na forma de pó finamente moído, em associação com matéria orgânica e atividade radicular. A combinação de transformações mineralógicas diagnosticadas por DRX, desenvolvimento de comunidades microbianas e biofilmes observados em MEV e crescimento de *Zea mays* em sistema sem solo sustenta a classificação desses materiais como agrominerais silicáticos com potencial para reduzir, ao menos parcialmente, a dependência de fertilizantes sintéticos em sistemas agrícolas sustentáveis, em consonância com proposições de uso de pós de rocha na agricultura (Bezerra, 2010; Argenta, 2023; Martins *et al.*, 2024). Esse potencial é particularmente relevante no contexto brasileiro, marcado por elevada dependência de K importado e ampla disponibilidade de rochas silicáticas de diferentes composições.

Ao mesmo tempo, o delineamento experimental adotado — cultivo direto em pó de rocha com cama de aviário, sem solo — mostrou-se uma ferramenta poderosa para isolar e investigar as interações entre minerais, microrganismos e raízes, eliminando a

interferência da mineralogia complexa do solo natural. Esse tipo de sistema-modelo responde à demanda da literatura por abordagens capazes de compreender os mecanismos de biointemperismo em escala de grão, alinhando-se ao debate sobre *Enhanced Weathering* e agricultura regenerativa (Beerling *et al.*, 2020). No entanto, a extrapolação dos resultados para condições de campo requer cautela e a realização de ensaios adicionais em solos reais, com diferentes texturas, climas e sistemas de manejo, bem como a comparação com outros litotipos e fontes de matéria orgânica.

A discussão dos resultados mostra que a reatividade mineral, a presença de matriz devitrificada rica em K, a evolução da microbiota e a arquitetura radicular de *Zea mays* atuam de forma integrada para promover o biointemperismo de rochas vulcânicas ácidas da Serra Geral e a liberação de nutrientes em escalas temporais compatíveis com o uso agrícola. Esses achados fortalecem o papel dos agrominerais silicáticos como componente estratégico em sistemas agrícolas mais resilientes, exigindo, contudo, investigações complementares que quantifiquem fluxos de nutrientes, eficiência agronômica e possíveis contribuições ao sequestro de carbono em contextos de *Enhanced Weathering* (Beerling *et al.*, 2020).

6. Conclusões

As rochas vulcânicas ácidas do Grupo Serra Geral aqui estudadas, um riolito (P1) e um dacito (P2), apresentam mineralogia dominada por plagioclásio cálcico a intermediário, clinopiroxênio (augita), hornblenda, montmorilonita, estilbita e matriz devitrificada rica em K, o que configura um conjunto de fases potencialmente reativas, compatíveis com o uso como agrominerais silicáticos em sistemas agrícolas sustentáveis.

Os ensaios em sistema sem solo, com *Zea mays* cultivado diretamente em pó de rocha misturado à cama de aviário por 60 e 216 dias, demonstraram que ambos os materiais são capazes de sustentar o crescimento vegetal, incluindo a formação de espiga no tratamento com riolito (1C) e maior vigor vegetativo no dacito (2C), evidenciando a liberação efetiva de nutrientes a partir das rochas, em associação com a matéria orgânica.

As análises de DRX quantitativas, com refinamento de Rietveld, indicaram consumo seletivo de montmorilonita, estilbita, hornblenda, augita e, em alguns casos, laboradorita, acompanhado de enriquecimento relativo de minerais mais resistentes, como o quartzo, corroborando a atuação de processos de biointemperismo intensificado na rizosfera sob forte atividade radicular e microbiana.

As imagens de MEV revelaram o desenvolvimento progressivo de comunidades microbianas complexas (bactérias, actinomicetos, hifas fúngicas e possíveis fungos micorrízicos) e de extensos biofilmes de substâncias poliméricas extracelulares, diretamente associados a feições de corrosão, ao arredondamento de arestas e à penetração de filamentos nos grãos minerais, confirmando o papel central do biointemperismo microbiano na dissolução mineral e na liberação de nutrientes dos pós de rocha.

Do ponto de vista agronômico, o dacito tende a atuar como fonte mais robusta de bases (Ca, Mg, K), promovendo maior crescimento da parte aérea e do sistema radicular, enquanto o riolito se destaca como fonte relevante de K associado à matriz devitrificada e a fases secundárias, de modo que ambos os litotipos se configuram como agrominerais silicáticos promissores para reduzir parcialmente a dependência de fertilizantes sintéticos em sistemas agrícolas sustentáveis no Brasil.

Apesar do potencial evidenciado, o número reduzido de repetições nas análises mineralógicas ($n = 1$ por tratamento/tempo) e a ausência de análises químicas do tecido vegetal limitam a robustez estatística e a quantificação direta dos fluxos de nutrientes das rochas para as plantas, indicando a necessidade de estudos futuros com maior número de réplicas, balanços de massa, ensaios em vasos fechados, evitando a perda de nutrientes para consolidar o uso desses agrominerais silicáticos e sua eventual contribuição a estratégias de *enhanced weathering* em agricultura.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Instituto Tecnológico de Paleocianografia e Mudanças Climáticas (ITT OCEANEON) pelo acesso aos laboratórios de difração de raios X, fluorescência de raios X e microscopia eletrônica de varredura, e à Universidade do Vale do Rio dos Sinos pelo acesso ao Laboratório de Laminação e Petrografia Ótica.

Contribuições dos Autores: "Concepção, T.S., L.V.O. e A.S.; metodologia, T.S., L.V.O. e A.S.; análise formal, G.A.T., T.S., L.V.O. e A.S.; pesquisa, G.A.T. e T.S.; preparação de dados, G.A.T. e T.S.; escrita do artigo, G.A.T., L.V.O. e A.S.; revisão, G.A.T.; supervisão, A.S. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito".

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

- Anbeek, C. 1992. The dependence of dissolution rates on grain size for some fresh and weathered feldspars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(11): 3957-3970. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90009-8)
- Argenta, C.V.; Brum, A.L.; Allebrandt, S.L.; Mueller, A.A. 2023. A realidade do mercado de fertilizantes no Brasil: uma breve análise. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 16(3): 1-17. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2023v16n3e10998>
- Beerling, D.J.; Kantzas, E.P.; Lomas, M.R.; Wade, P.; Eufrazio, R.M.; Renforth, P.; Sarker, B.; Andrews, M.G.; James, R.H.; Pearce, C.R.; Mercure, J.F.; Pollitt, H.; Holden, P.B.; Edwards, N.R.; Khanna, M.; Koh, L.; Qegan, S.; Pidgeon, N.F.; Janssens, I.A.; Banwart, S.A. 2020. Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature*, 583: 242-248. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>
- Berude, M.C.; Almeida, D.S.; Riva, M.M.; Cabanêz, P.A.; Amaral, A.A. 2015. Micorrizas e sua importância agroecológica. *Enciclopédia Biosfera*, 11(22): 132-146.
- Bezerra, M.S. 2010. Rochas, minerais e rotas tecnológicas para produção de fertilizantes alternativos. In: Luz, A.B.; Lins, F.A.F. (org.). *Agrominerais para o Brasil*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, pp. 199-222.
- Bish, D.L. & Post, J.D. 1993. Quantitative mineralogical analysis using the Rietveld full-pattern fitting method. *American Mineralogist*, 78(9-10): 932-940.
- Bonfante, P.; Genre, A. 2010. Mechanisms underlying beneficial plant-fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature Communications*, 1: 48. <https://doi.org/10.1038/ncomms1041>
- Brantley, S.L. 2008. Kinetics of mineral dissolution. In: Brantley, S.L.; Kubicki, J.D.; White, A.F. (ed.). *Kinetics of water-rock interaction*. New York: Springer, pp. 151-210.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Gabinete da Ministra. 2016. *Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016*. Estabelece as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. Diário Oficial da União, seção 1, p. 10-11, 14 mar. 2016.
- Brehm, U.; Gorbushina, A.; Mottershead, D. 2005. The role of microorganisms and biofilms in the breakdown and dissolution of quartz and glass. *Paleogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology*, 219(1-2): 117-129. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.10.017>
- Broom, D. 2020. *This is why food security matters now more than ever*. In: World Economic Forum, Davos.
- Chipera, S.J. & Apps, J.A. 2001. Geochemical stability of natural zeolites. *Clays and Clay Minerals*, 45 (1): 117-161. <https://doi.org/10.2138/rmg.2001.45.3>
- Cornelis, J-T. & Delvaux, B. 2026. Soil processes drive the biological silicon feedback loop. *Functional Ecology*, 30(8): 1298-1310. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12704>

Deer, W.A.; Howie, R.A.; Zussman, J. 1992. *An introduction to the rock-forming minerals*. 2nd ed. Harlow: Prentice Hall.

Ferreira, A.A. 2022. *Vulcano-estratigrafia e geoquímica de derrames da Província Magmática Paraná na região de Arvorezinha e Guaporé – RS*. Monografia (Trabalho de Formatura em Geologia) – Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo. <https://bdta.abcd.usp.br/item/003149499>

Freitas, V.A. 2009. *Geração de magmas ácidos na Província Magmática Paraná, região de Piraju-Ourinhos (SP): uma contribuição da geoquímica isotópica e de elementos traço em rochas e minerais*. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.44.2009.tde-08062009-153408>

Gorbushina, A.A. 2009. Fungi in biogeochemical cycles. In: Gadd, G.M. (ed.). *Fungi in biogeochemical cycles*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 267-288. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511550522>

Horn, B.L.D.; Oliveira, A.A.; Simões, M.S.; Besser, M.L.; Araújo, L.L. 2022. *Mapa geológico da Bacia do Paraná*. Porto Alegre: SGB-CPRM. Escala 1:1.000.000. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/23037>. Acesso em: 12 mar. 2026.

Israeli, Y. & Emmanuel, S. 2018. Impact of grain size and rock composition on simulated rock weathering. *Earth Surface Dynamics*, 6: 319-327. <https://doi.org/10.5194/esurf-6-319-2018>.

Justo, A.P.; Bergmann, M.; Hoff, R.; Perrotta, M.M. 2013. Identificação de minerais do grupo das zeólitas por espectroscopia de reflectância, para aplicação como remineralizadores de solo. In: Congresso Brasileiro de Rochagem, 2., 2013, Poços de Caldas. *Anais...* Poços de Caldas: [s.n.], p. 265-273.

Lambers, H.; Chapin III, F.S.; Pons, T.L. 2008. *Plant physiological ecology*. 2nd ed. New York: Springer.

Le Bas, M.J.; Le Maitre, R.W.; Streckeisen, A.; Zanettin, B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27: 745-750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>.

Martins, E.S.; Theodoro, S.H.; Bernadez, F.F.G.; Luchese, A.V.; Bergmann, M.; Siqueira, D.S.; Teixeira, A.; Azevedo, A.; Curtis, J.C.D. 2024. Produção brasileira de remineralizadores e fertilizantes naturais: 2019 a 2023. *Revista Novo Solo*, 6: 14-29.

Ming, D.W. & Mumpton, F.A. 1989. Zeolites in soils. In: Dixon, J.B.; Weed, S.B. (Ed.). *Minerals in soil environments*. 2nd ed. Madison: Soil Science Society of America, pp. 873-911.

Nesbitt, H.W. & Young, G.M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 1523-1534. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90408-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90408-3).

Pawlak, K. & Kołodziejczak, M. 2020. The role of agriculture in ensuring food security in developing countries: considerations in the context of the problem of sustainable food production. *Sustainability*, 12(13): 5488. <https://doi.org/10.3390/su12135488>

Poppe, L.J.; Paskevich, V.F.; Hathaway, J.C.; Blackwood, D.S. 2002. *A laboratory manual for X-ray powder diffraction*. United States Geological Survey, Open-File Report 01-041.

Rehman, A.; Farooq, M.; Lee, D.J.; Siddique, K.H.M. 2022. Sustainable agricultural practices for food security and ecosystem services. *Environmental Science and Pollution Research*, 29: 84076-84095. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23635-z>

Silveira, C.A.P.; Bamberg, A.L.; Martinazzo, R.; Pillon, C.N.; Martins, E.D.; Piana, C.F.B.; Ferreira, L.H.G.; Pereira, I.S. 2019. *Protocolo para avaliação da eficiência agrônômica de remineralizadores de solo*. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado.

Sparks, D.L. 1987. Potassium dynamics in soils. *Advances in Soil Science*, 6: 1-63. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4682-4_1

United Nations (ONU). Department of Economic and Social Affairs. Population Division. 2022. *World population prospects 2022: summary of results*. New York: United Nations.

Vandevivere, P.; Welch, S.A.; Ullman, W.; Kirchman, D. 1994. Enhanced dissolution of silicate minerals by bacteria at near-neutral pH. *Microbial Ecology*, 27: 241-251. <https://doi.org/10.1007/BF00182408>

Wilpiseski, R.L.; Aufrecht, J.A.; Retterer, S.T.; Sullivan, M.B.; Graham, D.E.; Pierce, E.M.; Zablocki, O.D.; Palumbo, A.V.; Elias, D.A. 2019. Soil aggregate microbial communities: toward understanding microbiome

interactions at biologically relevant scales. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(14): e00324-19.
<https://doi.org/10.1128/AEM.00324-19>