



Universidade Federal Rural De Pernambuco

Departamento de Agronomia

Laboratório de Química do Solo

Relatório do Estágio Supervisionado Obrigatório-
Avaliação de pós de rocha quanto à dissolução e liberação de nutrientes *in vitro*

Elayni Araújo Esteves

Recife

Agosto/2024

Elayni Araújo Esteves

**Relatório do Estágio Supervisionado Obrigatório-
Avaliação de pós de rocha quanto à dissolução e liberação de nutrientes *in vitro***

Relatório de Estágio supervisionado Obrigatório apresentado ao curso de Bacharelado em Agronomia para a obtenção do título de Engenheira Agrônoma pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (SEDE).

Orientador: Prof. Dr. Jean Cheyson Barros dos Santos

Supervisora: Dra. Cybelle Souza de Oliveira

**Recife
Agosto/2024**

Elayni Araújo Esteves

Avaliação de pós de rocha quanto à dissolução e liberação de nutrientes *in vitro*

Aprovado em: 02/08/2024

BANCA EXAMINADORA

Orientador

Dr. Jean Cheyson Barros dos Santos
Professor – UFRPE

Examinador 1

Msc. Analice Nunes Clarindo
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Examinador 2

Dra. Jéssica Rafaella de Sousa Oliveira
Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha família, que é meu alicerce, expresso minha eterna gratidão. À minha mãe, Joana Darc Melo de Araújo, por seu apoio e paciência, força e carinho; ao meu pai, Heleno Batista Esteves (*in memoriam*), por seu exemplo de força, bondade e determinação; à minha irmã, Kaline Araújo Esteves, incentivo constantes.

Ao meu primo, José Carlos, engenheiro elétrico, que serviu de inspiração mostrando que a educação e os estudos abrem portas. Além disso, ele foi a pessoa que mais me apoiou no primeiro ano da faculdade.

Aos meus amigos Thiago, Monaliza e Lidiana, que estiveram ao meu lado durante a graduação, compartilhando desafios, muitas risadas e conquistas. Em especial ao Mateus Delmiro, por sempre me apoiar e incentivar.

Ao laboratório de Fitovirologia da UFRPE, onde comecei minha jornada científica, minha profunda gratidão à Profa. Dra. Rosana Blawid e à Dra. Géssyka Rodrigues por sua orientação e conselhos.

Aos amigos que fiz durante o PET, que tornaram essa experiência mais agradável e enriquecedora: Maria Eduarda, Larissa, Victor, Steffany e Fernanda.

Agradeço ao orientador Prof. Dr. Jean Cheyson e à Dra. Cybelle Souza, cujos ensinamentos e orientação foram fundamentais para o sucesso deste trabalho, assim como pelo apoio durante os dois anos que passei realizando o PIBIC neste grupo de pesquisa.

Um agradecimento especial à Arthur e Karollayny pela dedicação e amizade. Aos outros integrantes do grupo de Química do solo e Intemperismo, meu sincero agradecimento pelo suporte e colaboração ao longo do processo.

A todos(as) que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Nos últimos anos, os desafios das mudanças climáticas e da degradação do solo, agravados pela agricultura intensiva, têm impulsionado a busca por práticas sustentáveis. A utilização de pós de rocha como fertilizantes apresenta-se como uma alternativa promissora, devido à liberação lenta de nutrientes, reduzindo perdas por lixiviação e poluição. Este estudo teve como objetivo caracterizar e avaliar a solubilidade de pós de rochas de basalto (PR-01) e actinolita-talco xisto (AP-C1) em soluções de ácidos orgânicos (acético, cítrico, láctico, málico e oxálico) e em água destilada. A caracterização química e mineralógica foi realizada por Fluorescência de Raios-X (FRX) e Difractometria de Raios-X (DRX). Adicionalmente, amostras das rochas originárias dos dois pós foram impregnadas com resina e confeccionadas em lâminas delgadas para descrições petrográficas por microscopia óptica. Os experimentos de dissolução quantificaram pH, condutividade elétrica e teores de sódio e potássio nas soluções extraídas. Os resultados indicaram que o ácido cítrico foi o mais eficiente na extração de potássio na amostra PR-01, enquanto o ácido acético destacou-se na amostra AP-C1. A análise química total por ICP-AES revelou que a amostra AP-C1 ultrapassou o limite permitido para chumbo (200 ppm), estipulado pela Instrução Normativa nº 5/2016 do MAPA, tornando-a imprópria para uso como remineralizador. Por outro lado, o pó de rocha de basalto demonstrou grande potencial como remineralizador, devido à liberação lenta e contínua de nutrientes, minimizando perdas e favorecendo a sustentabilidade. Estudos futuros devem avaliar a dinâmica de outros elementos *in vitro* e *in vivo*, bem como a eficiência agrônômica em campo, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias de baixa emissão de carbono e de descarbonização.

Palavras-chave: Agricultura de Baixo Carbono; Fertilidade; Solubilidade assistida.

ABSTRACT

In recent years, the challenges of climate change and soil degradation, aggravated by intensive agriculture, have driven the search for sustainable practices. The use of rock powders as fertilizers presents itself as a promising alternative, due to the slow release of nutrients, reducing losses due to leaching and pollution. This study aimed to characterize and evaluate the solubility of basalt rock powders (PR-01) and actinolite-talc schist (AP-C1) in organic acid solutions (acetic, citric, lactic, malic and oxalic) and in distilled water. Chemical and mineralogical characterization was performed by X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffractometry (XRD). Additionally, samples of the rocks originating from the two powders were impregnated with resin and made on thin slides for petrographic descriptions by optical microscopy. The dissolution experiments quantified pH, electrical conductivity and sodium and potassium contents in the extracted solutions. The results indicated that citric acid was the most efficient in potassium extraction in the PR-01 sample, while acetic acid stood out in the AP-C1 sample. The total chemical analysis by ICP-AES revealed that the AP-C1 sample exceeded the allowed limit for lead (200 ppm), stipulated by Normative Instruction No. 5/2016 of MAPA, making it unsuitable for use as a remineralizer. On the other hand, basalt rock dust has shown great potential as a remineralizer, due to the slow and continuous release of nutrients, minimizing losses and favoring sustainability. Future studies should evaluate the dynamics of other elements in vitro and in vivo, as well as agronomic efficiency in the field, contributing to the development of low-carbon and decarbonization technologies.

Keywords: Low Carbon Agriculture; Fertility; Assisted solubility.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	9
2.1	Geral.....	9
2.2	Específicos	9
3	METODOLOGIA	9
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	10
4.1	Caracterização mineralógica	10
4.2	Caracterização granulométrica e química	14
4.3	Dissolução “ <i>in vitro</i> ”	15
4.3.1	Avaliação do pH e condutividade elétrica.....	15
4.3.2	Liberação de potássio e sódio	19
5	CONCLUSÕES	23
6	REFERÊNCIAS	23

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o mundo tem enfrentado muitos desafios relacionados às mudanças climáticas, altas temperaturas e degradação do solo. Esses problemas estão intimamente ligados à liberação de gases de efeito estufa (GEE) (delanhese et al., 2024). A agricultura intensiva é um dos principais contribuintes para a emissão desses gases e para a degradação do solo (Cerri et al., 2015). No entanto, tecnologias e práticas de manejo voltadas para a melhoria da saúde do solo têm como objetivo minimizar a liberação de GEE.

Um dos grandes desafios na agricultura é o manejo adequado da adubação, pois uma parte considerável dos nutrientes adicionados ao solo é perdida por lixiviação, erosão e também sob a forma de gás. Um dos fatores pode estar associado a essa perda é a alta solubilidade dos fertilizantes convencionais. Além disso, o Brasil é responsável por cerca de 4,29 % do consumo global de fertilizantes, sendo o segundo maior consumidor do mundo (Brasil, 2024). O país também enfrenta uma grande dependência das importações de fertilizantes para sustentar sua produção agrícola. Em 2015, cerca de 70% do consumo total foi suprido por importações (Embrapa, 2018).

Uma das alternativas que vêm sendo estudadas para reduzir a dependência externa do Brasil das importações de fertilizantes, além de minimizar os impactos ambientais, é a utilização de remineralizadores como fertilizante ou complemento no ambiente agrícola. Estudos demonstraram que o pó de rocha fornece benefícios químicos, com uma liberação lenta dos nutrientes (Assunção et al., 2024). Dessa forma, os elementos não são facilmente lixiviados, o que contribui para a redução da poluição.

Porém, para que seja classificado como remineralizador, de acordo com a Lei nº 12.890/2013, material deve passar apenas processos de redução de tamanho de partículas. Ademais, deve incrementar ao solo macro e micronutrientes nutrientes, além de favorecer as propriedades físicas, físico-químicas ou biológica do solo (Brasil, 2013).

Os remineralizadores são menos solúveis em comparação que fertilizantes convencionais. Portanto, mecanismos do solo são essenciais para a solubilização destes materiais. A produção de ácidos orgânicos por microrganismo e plantas fazem parte de uma série de fenômenos que ocorrem nos solos os quais solubilizam os minerais. Entre os ácidos orgânicos estão ácido oxálico, ácido cítrico, ácido acético, ácido málico e ácido láctico, dentre outros (Adeleke et al., 2017).

Dessa forma, a dissolução de minerais desempenha um papel importante na liberação dos nutrientes retidos nas estruturas cristalinas das rochas. Além disso, o tipo de material que é solubilizado influencia diretamente nas características da solução do solo (Fyfe et al., 1978). Assim, após da dissolução haverá uma liberação de elementos que são essenciais para os desenvolvimentos das plantas, e conseqüentemente, para a vida na terra.

Diante disso, este estudo avaliou o potencial de pós de rocha como remineralizadores, considerando sua caracterização química e mineralógica, além de investigar a solubilização de elementos em soluções ácidas e água. Essa abordagem buscou contribuir para o aprimoramento do uso de remineralizadores na agricultura, alinhando-se ao “Protocolo para Avaliação de Eficiência Agronômica de Remineralizadores de Solo”.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Caracterizar e avaliar a solubilidade de pós de rochas em soluções de ácidos orgânicos e em água.

2.2 Específicos

1. Caracterizar quimicamente e mineralogicamente os pós de rocha.
2. Quantificar a liberação de elementos solubilizados em meio ácido e em água *in vitro*.
3. Contribuir para a avaliação dos remineralizadores via “Protocolo para avaliação de eficiência agronômica de remineralizadores de solo”.

3 METODOLOGIA

A empresa Reminera forneceu o material o qual foi testado, que consiste em duas diferentes rochas: basalto (PR-01) e a outra actinolita-talco xisto (AP-C1) cominuídas. Neste trabalho foram seguidas as etapas de: caracterização dos pós de rocha e experimentos em condições controladas (em laboratório) do “Protocolo para Avaliação da Eficiência Agronômica de Remineralizadores de Solo”.

A química total dos remineralizadores foi determinada por Fluorescência de Raios-X, de acordo com a metodologia descrita por Mori et al. (1999). As amostras pulverizadas foram secas em estufa a 60 °C e posteriormente foi determinada a perda por ignição (LOI). Foram

determinados Al_2O_3 , BaO , CaO , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , P_2O_5 , K_2O , SiO_2 , NaO , SrO e TiO_2 por meio de fusão com metaborato de lítio a $1000\text{ }^\circ\text{C}$ e dissolução em ácido nítrico 4% e ácido hidrocloreídrico 2%. A solução foi analisada por ICP-AES, os resultados foram corrigidos e o percentual de óxidos foi calculado.

A caracterização mineralógica das amostras foi determinada por Difractometria de Raios-X, e com amostras previamente moídas e homogeneizadas.

Amostras das rochas originárias dos dois pós estudados foram impregnadas com resina e foram confeccionadas as lâminas delgadas para descrições petrográficas por microscopia óptica. A composição e as características mineralógicas das rochas foram analisadas com imagens capturadas a partir de polarizadores descruzados e polarizadores cruzados em um microscópio petrográfico acoplado a um equipamento de captura de imagem digital. A contagem modal foi de 500 pontos por lâmina delgada.

O experimento para avaliar a dissolução e liberação de elementos dos pós de rocha foi realizado utilizando cinco ácidos orgânicos (ácido acético, ácido cítrico, ácido láctico, ácido málico e ácido oxálico) e água destilada, totalizando seis tratamentos, com duas repetições. A concentração utilizada dos ácidos foi de $0,01\text{ mol L}^{-1}$, que corresponde de 10^2 a 10^4 vezes a concentração destes ácidos na rizosfera (Jones, 1998; Strobel, 2001). Foram utilizados tubos tipo Falcon de 50 mL preenchidos com 10g de cada remineralizador e 40 mL de solvente (proporção 1:4, m/v). Os tubos foram mantidos em agitação horizontal a 120 rpm durante 14 horas. Posteriormente, os tubos foram centrifugados a 3000 rpm por 15 minutos e o sobrenadante foi recolhido e imediatamente foram feitas as medidas de pH e condutividade elétrica (CE). No mesmo tubo Falcon com o pellet das amostras, foram colocados nova solução do solvente, e todo o processo foi repetido cinco vezes. Os sobrenadantes foram avaliados por fotômetro de chama para as análises de sódio e potássio para determinação dos teores desses elementos químicos ali dissolvidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica foi realizada por Difractometria de Raios-X (DRX). Esta técnica permitiu identificar os minerais presentes nas amostras, proporcionando uma compreensão detalhada da sua composição mineralógica conforme demonstra a tabela 01.

Os resultados mostraram a presença predominante de minerais como talco, actinolita e clorita na amostra AP-C1. Já na amostra PR-01 foram encontrados minerais como plagioclásio, clinopiroxênio, minerais opacos e quartzo.

Tabela 01. Minerais presentes na composição do pó de rocha AP-C1 e PR-01

AP-C1		
Fase Mineral	Fórmula Química	Volume (%)
Talco	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	61,8
Actinolita	$Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	32,6
Minerais Opacos	-	4,4
Clorita	$(Mg,Al,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2.(Mg,Al,Fe)_3(OH)_6$	0,7
Carbonato	$Ca,Mg(CO_3)_2$	0,5
Biotita verde	$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH,O,F)_2$	<<1
PR-01		
Plagioclásio	$(Na-Ca)_nAlSi_3O_8$	71,6
Clinopiroxênio	$(Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(Si,Al)_2O_6$	17,0
Minerais Opacos	-	6,8
Oxidos-Hidroxidos Fe,Ti	-	4,6
Quartzo	SiO_2	<0,1

As imagens obtidas por meio de Petrografia com contagem modal, foram essenciais para quantificar os minerais os quais compõe as amostras AP-C1 e PR-01 (tabela 01, figuras 01 e 02).

Dos minerais encontrados na amostra AP-C1, o Talco está com 61,8 %, é um mineral o qual possui uma dureza 1 na escala de Mohs (Melo; Alleoni, 2019). Dessa forma, devido sua dureza ele se solubiliza mais rápido, liberando assim os elementos que os constituem, como por exemplo o magnésio. Outro mineral mais abundante é o Actinolita na amostra com 32,6 %, possui a dureza entre 5-6 (Melo; Alleoni, 2019). Dessa forma, devido a sua dureza é relativamente mais resistente. Em sua composição, geralmente, há presença de muitos elementos importantes para agricultura, como: cálcio, magnésio e ferro.

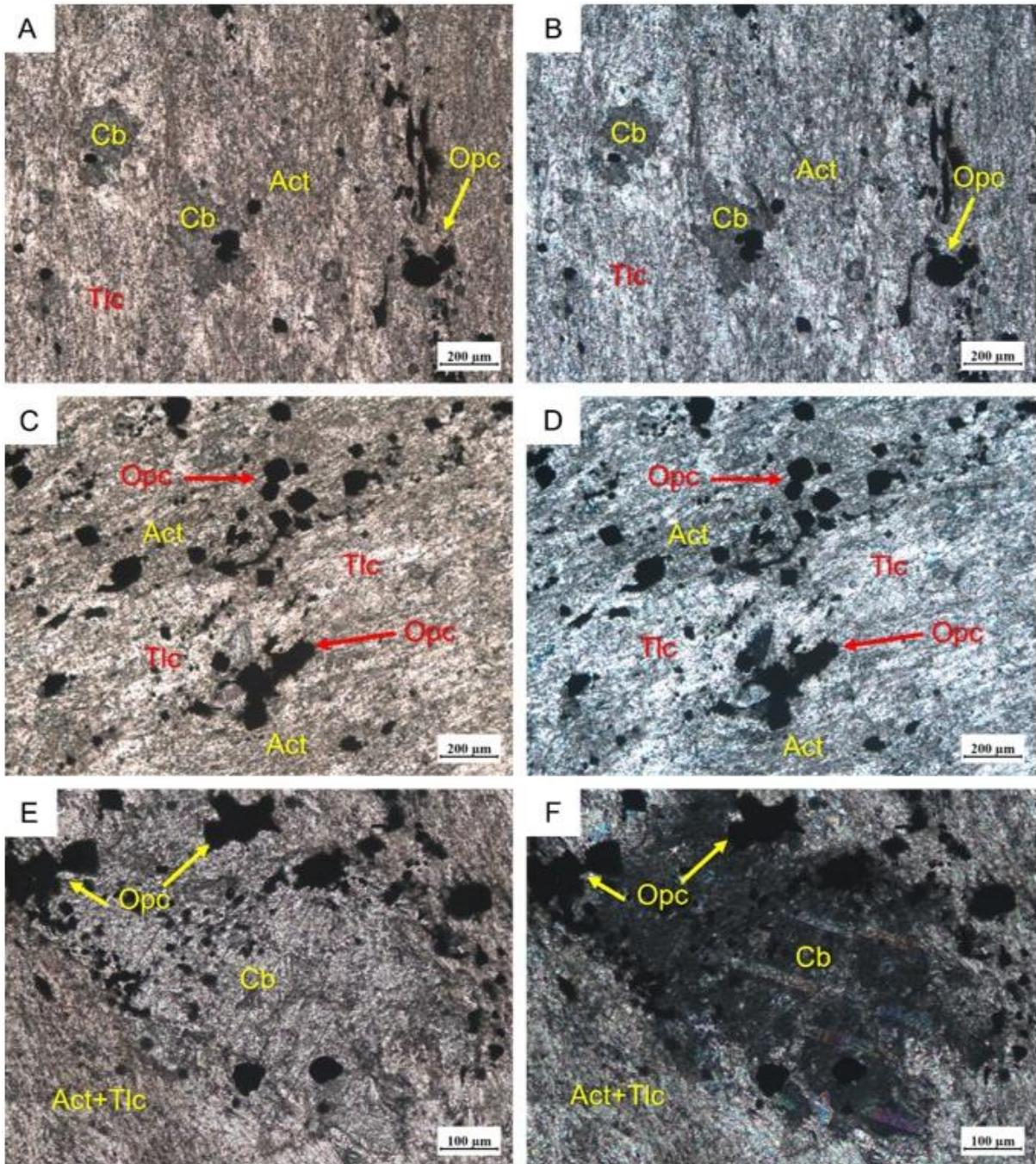


Figura 01. Fotomicrografia da amostra AP-C1; a), b) visão geral da amostra mostrando manchas de carbonato e cristais opacos em matriz foliada de granulação fina, constituída de actinolita e talco (a: imagem a polarizadores descruzados (PD); b: imagem a polarizadores cruzados (PX)); c), d) prismas e lamelas de actinolita e talco exibindo relevo e coloração contrastes (c: PD; d: PX)); e), f) detalhe de mancha de carbonato exibindo maclas lamelares (e: PD; f: PX); Cb= Carbonato; Act= actinolita; Tlc= talco; Opc= minerais opacos.

Na amostra PR-01, a predominância é do mineral Plagioclásio 71,6%, o qual possui dureza de 6, sua composição pode ter alto teores de cálcio ou sódio.

Outro mineral encontrado em mais abundância na amostra é o clinopiroxênio 17%, possui dureza de 5-6, e minerais como cálcio, magnésio, ferro e sódio em sua composição (Melo; Alleoni, 2019).

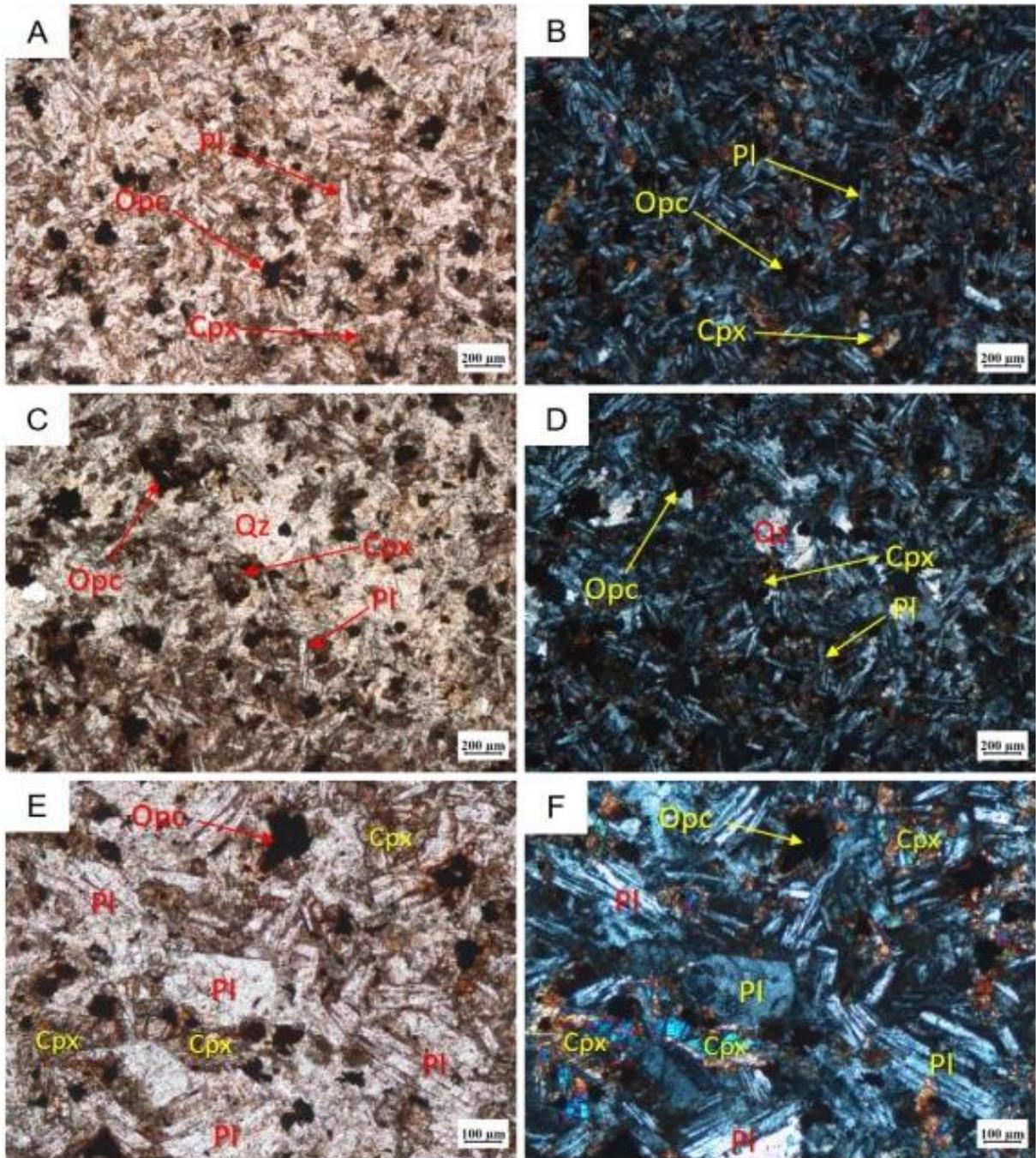


Figura 02. Fotomicrografias da amostra PR-01; a), b) visão geral mostrando rocha de granulação fina com ripas de plagioclásio e grão de piroxênio e minerais opacos (a: imagem a polarizadores descruzados (PD); b: imagem a polarizadores cruzados (PX)); c), d) quartzo intersticial (c: PD; d: PX); e), f) detalhe para ripas euédricas de plagioclásio e clinopiroxênio (e: PD; f: PX). Pl= plagioclásio; Opc= minerais opacos; Cpx= clinopiroxênio; Qz= quartzo.

Os resultados das análises de DRX juntamente com as petrográfica revelaram que ambas as amostras possuem um grande potencial como remineralizadores, devido sua composição mineralógica e os elementos de interesse agrônômicos. Entretanto, o MAPA estabeleceu normativas que são necessárias para que um produto seja classificado como remineralizador para fins de comercialização.

4.2 Caracterização granulométrica e química

Além das características químicas, os pós de rochas devem possuir uma distribuição de tamanhos de partículas que facilite a liberação gradual dos nutrientes. Dessa forma, de acordo com a Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016 do MAPA, a granulometria estipulada para pó implica no máximo de 100% na peneira 2 mm e mínimo de 50% na peneira de 0,3mm (Brasil, 2016).

A análise granulométrica realizada dos pós estudados (tabela 02) confirmou que as amostras atendem às especificações granulométricas estipuladas. A amostra AP-C1, 62,41% e amostra PR-01, 85,59% das partículas passaram pela peneira de 0,30 mm. Dessa forma, ultrapassando a porcentagem mínima estabelecida.

Tabela 02. Distribuição de tamanho de partícula das amostras AP-C1 e PR-01

Peneira	Granulometria	
	AP-C1	PR1
	Partículas Passantes (%)	
2,36 mm (ABNT n° 8)	-	100,00
2,00 mm (ABNT n°10)	100	98,99
0,84 mm (ABNT n°20)	92,81	86,34
0,30 mm (ABNT n°50)	62,41	85,59

Com base nas análises de química total por ICP-AES, foi possível determinar os níveis de metais pesados os quais apresentam riscos de toxidez tanto à saúde humana quanto ao solo (tabela 03). Os elementos potencialmente tóxicos são: arsênio, cádmio, mercúrio, chumbo, sendo as quantidades permitidas de 15, 10, 0,1 e 200 ppm, respectivamente (Brasil, 2016).

Como demonstra a tabela 03, os teores de arsênio, cádmio e mercúrio estão bem abaixo das quantidades estabelecida na normativa. Entretanto, na amostra AP-C1 ultrapassou as quantidades de chumbo. Dessa foram, a amostra AP-C1 foi considerada impróprias para ser utilizada como remineralizador.

Tabela 03. Teor de metais pesado e tóxicos nas amostras PR-01 e AP-C1

Elementos	Elemento Potencialmente Tóxicos	
	PR-01	AP-C1
	(Ppm)	
As	< 20	< 1,25
Cd	< 0,001	3,56
Hg	< 0,025	< 0,025
Pb	< 20	310,16

As = Arsênio; Cd = Cádmio; Hg = Mercúrio; Pb = Chumbo

A Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016 do MAPA também determina que a soma de bases deve ser igual ou superior a 9% e teor de óxido de potássio (K₂O) deve ser igual ou superior a 1% (Brasil, 2016).

As somas de bases foram superiores a quantidade mínima estabelecida, as amostras AP-C1 e PR-01 obtiveram os resultados de 27,93% e 10,30%, respectivamente (tabela 04). Em relação ao teor de óxido de potássio (K₂O), a amostra AP-C1 não superou o mínimo estabelecido pela normativa do MAPA.

Tabela 04. Resultado obtido Fluorescência de Raios-X dos óxidos de interesse para classificação de remineralizador.

Minerais	Garantia	
	AP-C1	PR-01
	(%)	
CaO	0,52	6,27
MgO	27,40	1,24
K ₂ O	0,01	2,79
Soma de Bases	27,93	10,30

4.3 Dissolução “*in vitro*”

4.3.1 Avaliação do pH e condutividade elétrica

Segundo Adeleke et al. (2017), a capacidade dos ácidos orgânicos do solo para dissolver minerais insolúveis no solo é atribuída a três mecanismos principais: acidificação, quelação e reações de troca. Por essa razão, ensaios de dissolução são fundamentais para compreender a interação entre o pó de rocha e os ácidos orgânicos, naturalmente presentes no solo devido à liberação por plantas e microrganismos.

As medições de pH e CE foram essenciais para analisar a dissolução dos elementos nos sobrenadantes durante o período das extrações, na tabela 05 encontram-se as leituras de pH e CE dos ácidos orgânicos e da água destilada utilizados para extração dos elementos dos pós de rocha.

Tabela 05. Leitura de pH e CE dos ácidos orgânicos e da água destilada.

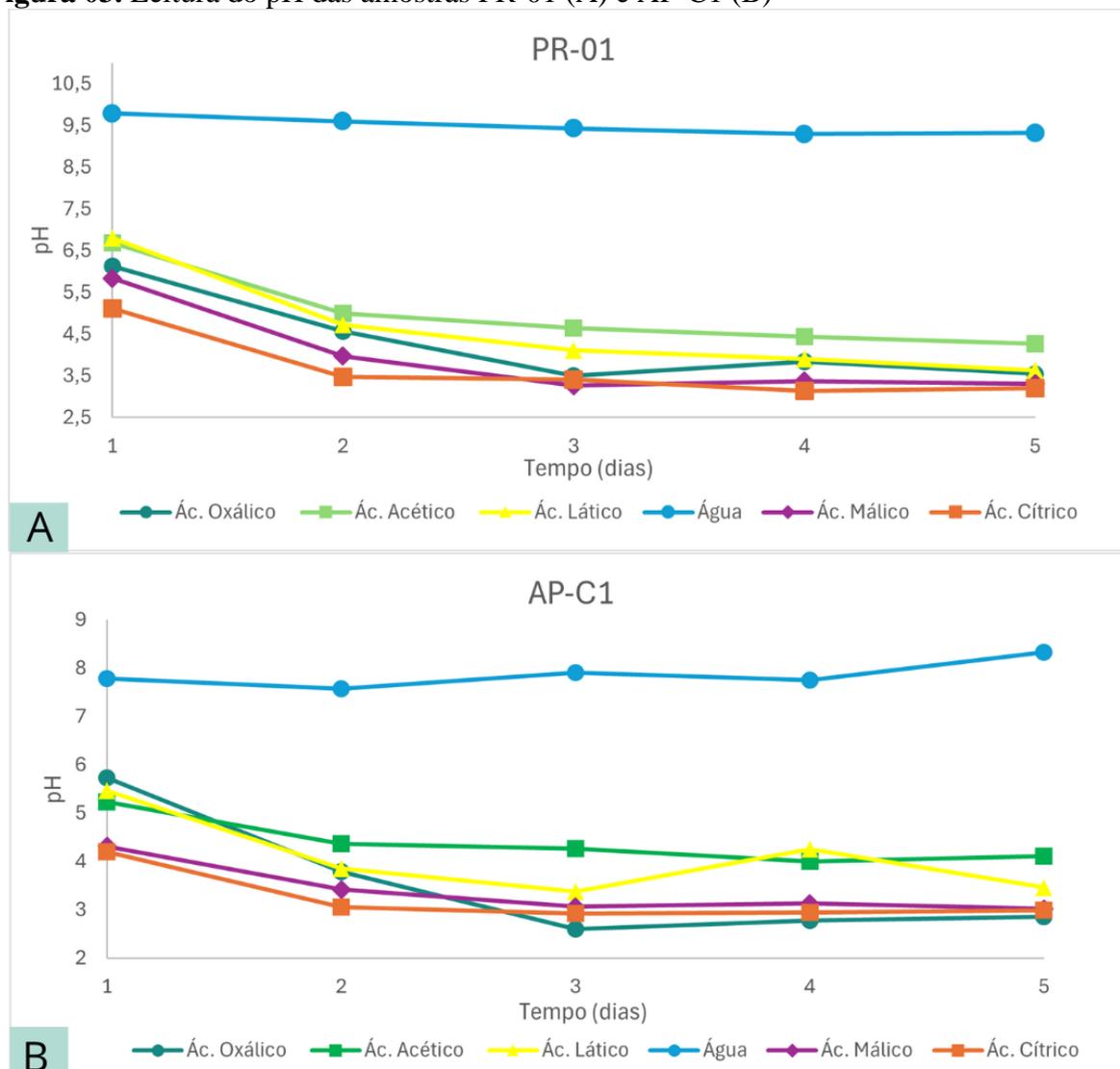
Extratores	pH	CE (dS m⁻¹)
Ácido oxálico	2,35	0,0022
Ácido acético	3,46	0,1725
Ácido lático	2,88	0,4982
Água	5,63	0,0022
Ácido málico	2,71	0,6294
Ácido cítrico	2,61	0,8742

Os ácidos orgânicos utilizados nesse estudo fazem parte os grupos dos ácidos carboxílicos, os quais são classificados em mono, di e tri-carboxílico. Essa classificação é devida aos grupos carboxila presentes em suas estruturas (Vollhardt; Schore, 2013). Assim, o ácido cítrico é tri-carboxílico, os ácidos oxálico e málico são di-carboxílico, e os ácidos acético e lático são mono-carboxílico. Cada carboxila libera um próton de H⁺, assim, os ácidos acético e lático são os que menos liberam hidrogênio em comparação aos demais, e por isso, apresentam menores valores de pH.

No experimento de dissolução em PR-01 (Figura 03 A), comparando o pH das soluções extratoras (tabela 05) com o resultado da leitura de pH dos sobrenadantes, é perceptível o aumento de pH. O ácido oxálico apresentou pH 6,13; o ácido acético, 6,69; o ácido lático, 6,80; o ácido málico, 5,84; e o ácido cítrico, 5,11. Isto deve-se a dissolução inicial dos minerais e liberação dos elementos constituintes dos pós de rocha, principalmente cátions básicos.

Já a partir do segundo dia, houve um aumento na acidez dos sobrenadantes, e até o quinto dia os valores permaneceram constantes. No quinto dia, o ácido oxálico apresentou um valor de pH 3,55; o ácido acético, 4,27; o ácido lático, 3,63; o ácido málico, 3,31; e o ácido cítrico, 3,20. Isso sugere que a redução do pH resultou do aumento na concentração de íons hidrogênio provenientes dos ácidos orgânicos presentes na solução. Diferente dos ácidos, a água destilada, em comparação com as demais amostras, permaneceu constante com pH 9 durante os cinco dias.

Figura 03. Leitura do pH das amostras PR-01 (A) e AP-C1 (B)



Na amostra AP-C1 (figura 03 B), no primeiro dia o pH das amostras em todos os extratores possuem valores elevados em relação aos das soluções de extração. De forma geral, as amostras tiveram o comportamento semelhante as amostras do pó de rocha PR-01.

O ácido oxálico apresentou pH 5,73; o ácido acético, 5,23; o ácido láctico, 5,46; o ácido málico, 4,31; e o ácido cítrico, 4,20. Entretanto, o ácido láctico que aumentou o pH no dia 4 que foi 4,26 e diminuiu no dia 5 para 3,46. Já água permaneceu com valor constante de pH 7 e aumentou para 8,33 no quinto dia.

Na última coleta dos sobrenadantes as leituras de pH foram: ácido oxálico 2,58; o ácido acético, 4,11; o ácido málico, 3,02; e o ácido cítrico, 2,99.

Os resultados obtidos indicam que a interação entre os ácidos orgânicos e os pós de rocha promove alterações no pH das soluções, indicando a dissolução dos minerais e liberação de elementos dos pós de rocha. A diferença no comportamento dos ácidos orgânicos e da água destilada demonstraram que o processo de acidificação via presença de ácidos orgânicos aumentou a dissolução dos minerais presentes nos pós de rocha.

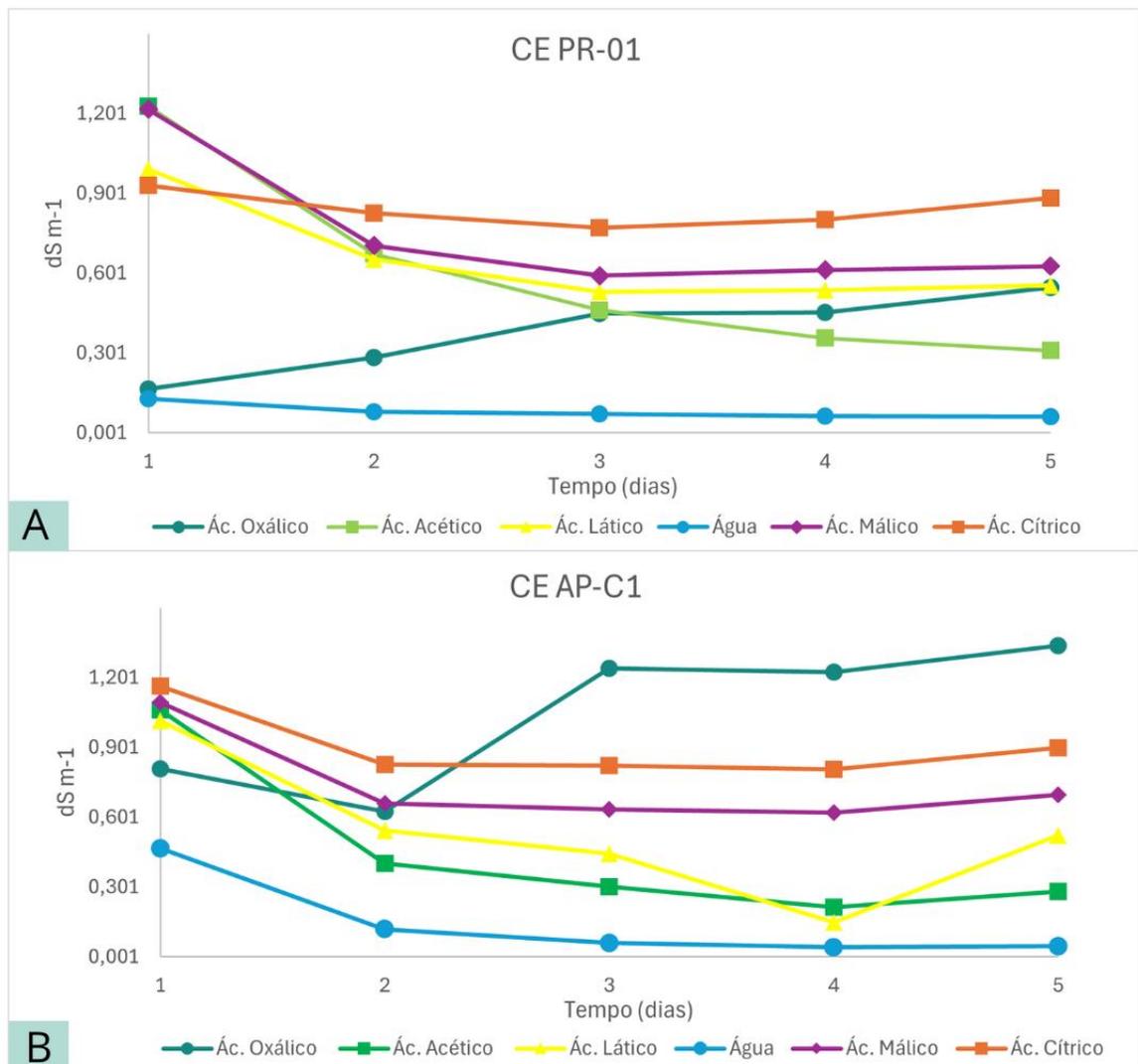
Com base nos resultados das leituras da condutividade elétrica da amostra PR-01, as leituras demonstraram que após o primeiro dia as amostras continuaram constante ao longo dos dias. A água mostrou-se mais estável em comparação as outras amostras. O ácido málico teve uma queda no segundo dia, estabilizando-se em seguida (figura 04 A).

O comportamento semelhante observado na amostra PR-01 ocorreu na amostra AP-C1. Entretanto, nessa amostra as leituras de condutividade elétrica aumentaram no terceiro dia e permaneceu constante (figura 04 B).

A leitura da condutividade elétrica baseia-se no princípio de medir a capacidade de uma substância de transmitir corrente elétrica. Os íons são responsáveis por transportar a carga elétrica, sendo os principais sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+) (Gheyi; Dias; Lacerda, 2016).

Os resultados obtidos das leituras da condutividade elétrica (CE), indicaram que no primeiro dia em ambos os pós (figura 04 A e B) houve um aumento em comparação entre os sobrenadantes e a CE da solução extratora (tabela 05). Esse fato pode ser atribuído aos cátions sódio, potássio, cálcio e magnésio na solução dos sobrenadantes. Entretanto a partir do segundo dia houve uma redução e permaneceu constante até o quinto dia. A amostra com ácido oxálico começou com a CE baixa e aumentou ao longo dos dias. Esses resultados podem ser explicados com mais clareza após a determinação dos cátions na solução das amostras.

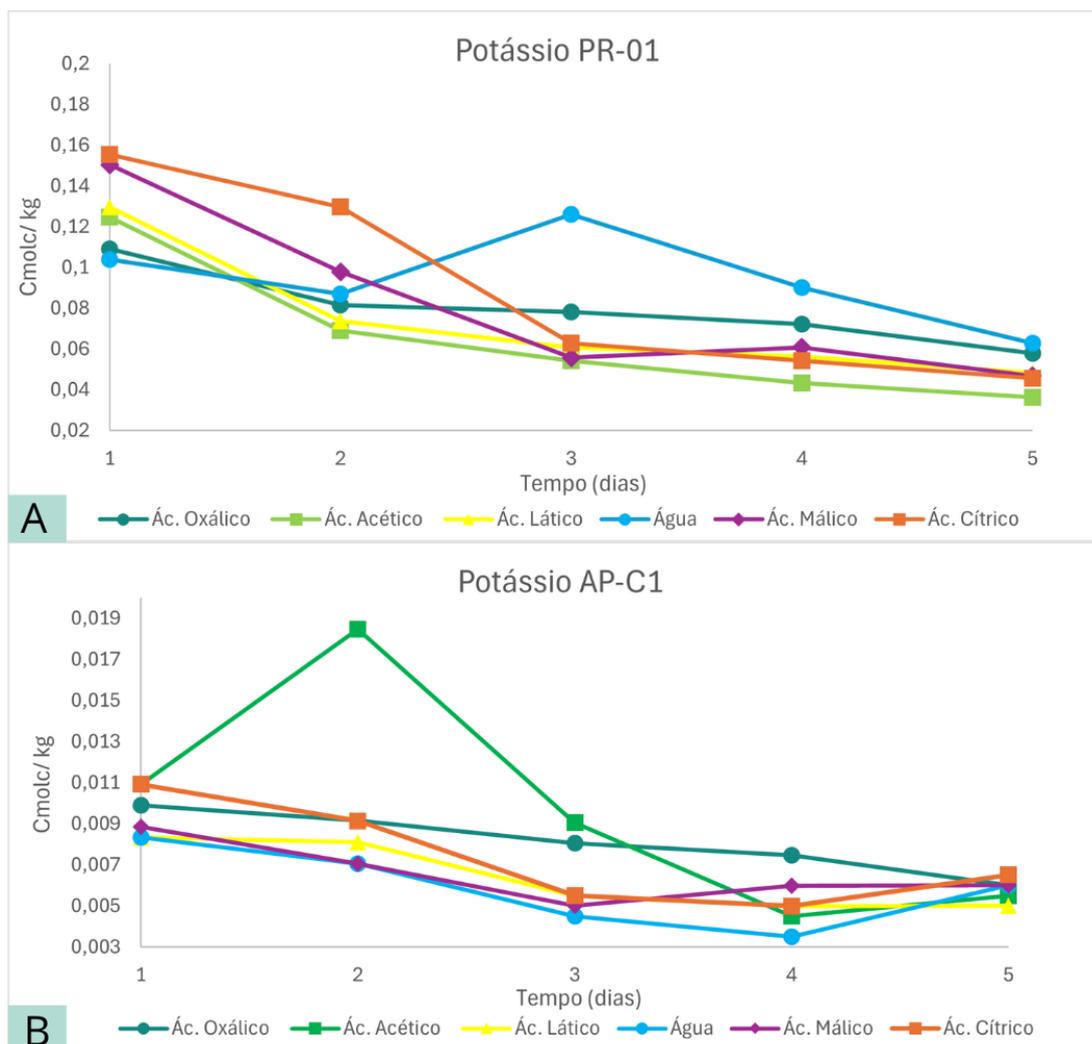
Figura 04. Leitura da condutividade elétrica das amostras PR-01 (A) e AP-C1 (B)



4.3.2 Liberação de potássio e sódio

Com relação a liberação de potássio, na amostra PR-01, o extrator que conseguiu extrair mais K^+ foi água, a soma dos cinco dias referentes ao teor de potássio foi de 0,47006 cmolc/kg. Em segundo lugar foi o ácido cítrico com 0,44814 cmolc/kg. E o que extraiu menos foi o ácido acético com 0,32745 cmolc/kg. No entanto, no terceiro dia referente a leitura de potássio com o extrator água, pode ter ocorrido uma contaminação que elevou os teores de potássio (figura 05 A). Pois, os ácidos orgânicos são mais eficientes na dissolução de minerais devido a liberação de H^+ .

Figura 05. Leitura do potássio da amostra PR-01 (A) e AP-C1 (B)



Na amostra AP-C1, o extrator que obteve maior teor de potássio foi o ácido acético com o total de 0,048 cmolc/kg. Em segundo lugar o ácido oxálico com o total de 0,041 cmolc/kg. E o que extraiu em menor quantidade foi a água com o somatório de 0,029 cmolc/kg (figura 05 B).

A amostra PR-01 liberou mais potássio do que a amostra AP-C1. Isso se deve ao teor de potássio presente em cada amostra: PR-01 possui um teor de K de 2,79%, enquanto AP-C1 tem apenas 0,01% (tabela 04). Essa diferença na extração é em razão da composição mineralógica das amostras a qual explica a maior liberação de potássio observada na amostra PR-01.

Machado et al. (2016) ao realizar a caracterização de resíduos de rochas ornamentais e a liberação de potássio com a aplicação de ácidos orgânicos, observaram que os tratamentos com ácidos orgânicos aumentaram significativamente a liberação de K⁺ dos resíduos de rochas.

O ácido cítrico, em particular, proporcionou uma maior liberação de K^+ em comparação ao ácido málico, obtendo resultados semelhantes aos das amostras do PR-01. No entanto, para a amostra do pó AP-C1, o ácido acético foi o mais eficaz na extração de potássio.

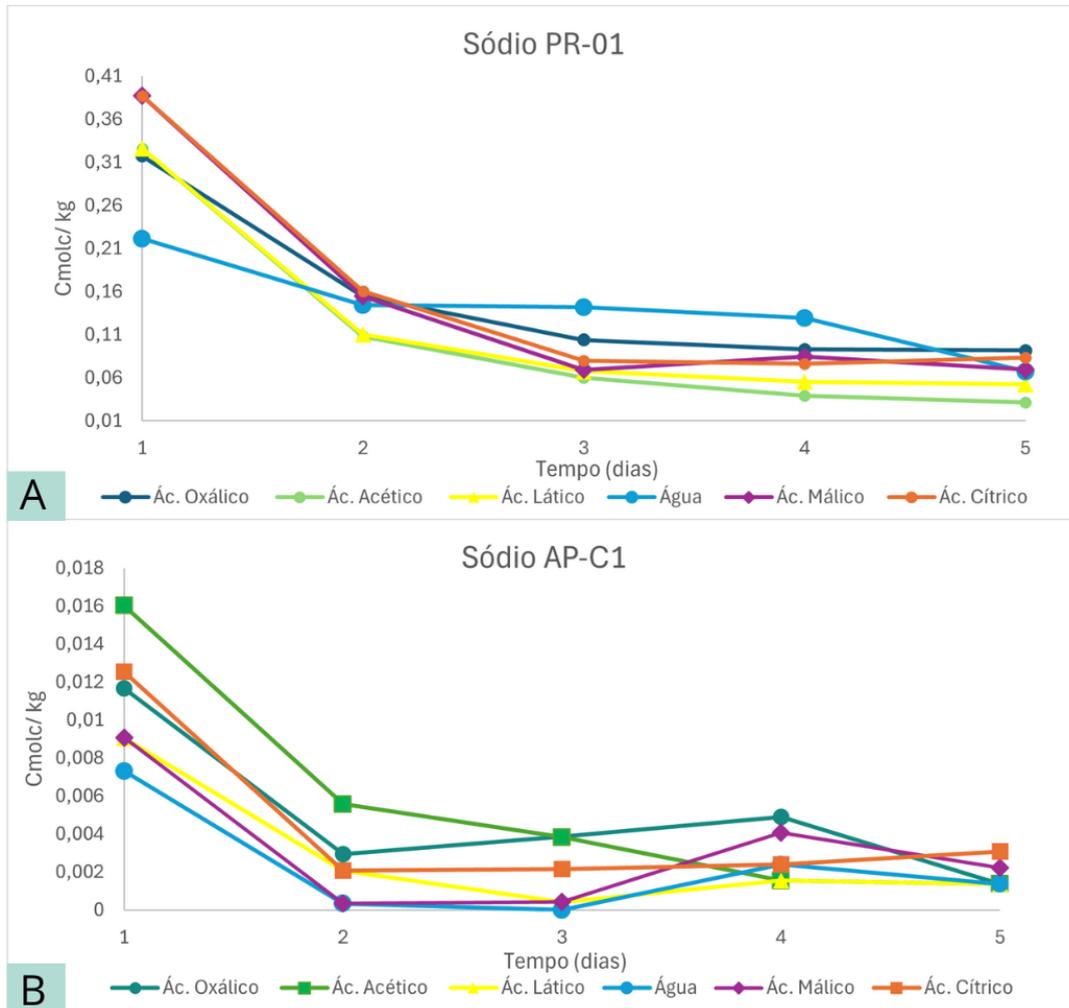
Os resultados obtidos das dissoluções das amostras indicaram valores interessantes de potássio. A amostra PR-01, demonstrou grande potencial para ser utilizada em campo. Entretanto, deve-se fazer estudos em casa de vegetação para comprovar sua eficiência. Em estudo de incubação feitos com pó oriundo de basalto, Conceição et al. (2022) tiveram resultados positivos os quais demonstraram aumento no acúmulo de macro e micronutrientes em plantas de milho e feijão. No entanto, quanto a amostra AP-C1, mesmo com algumas características mineralógicas interessantes, não pode ser utilizada devido à presença de altos teores de chumbo e o teor de potássio não atingiu a quantidade mínima exigida pelo MAPA.

Com relação a liberação de sódio, na amostra PR-01, o extrator o qual conseguiu extrair mais sódio foi o ácido cítrico, a soma dos cinco dias referentes ao teor de sódio foi de 0,7862 cmolc/kg. Em segundo lugar foi o ácido málico com 0,764991 cmolc/kg. E o que extraiu menos foi a água com 0,563852 cmolc/kg (figura 06 A).

Na amostra AP-C1, o extrator obteve maior teor de sódio foi o ácido acético com o total de 0,028 cmolc/kg. Em segundo lugar o ácido oxálico com o total de 0,025 cmolc/kg. E o que extraiu em menor quantidade foi a água com o somatório de 0,011 cmolc/kg (figura 06 B).

A extração de sódio e potássio nas amostras seguiu um padrão semelhante, com os mesmos ácidos orgânicos sendo eficazes na extração de ambos os elementos. Esse fenômeno pode ser atribuído à natureza monovalente do sódio e do potássio, o que facilita sua liberação de maneira similar quando submetidos a processos de extração ácida. Entretanto, mais análises são necessárias para entender o comportamento de dissolução e liberação de minerais em ácidos orgânicos.

Figura 06. Leitura do sódio da amostra PR-01 (A) e AP-C1 (B)



Os resultados obtidos nesse trabalho, sugerem que os tipos dos ácidos orgânicos podem influenciar de forma diferente a liberação de elementos de resíduos de rocha. O ácido cítrico e o ácido acético mostraram-se eficazes, o que pode ser atribuído a liberação de prótons de hidrogênio. A água destilada, como esperado, apresentou menor capacidade de extração. Exceto na amostra referente a extração de potássio do pó PR-01, mas que pode ser explicada como uma possível contaminação.

No contexto da avaliação de remineralizadores de solo, a presença de ácidos orgânicos mostrou-se eficaz para aumentar a disponibilidade de elementos no solo. Mais estudos podem relacionar a dissolução de outros elementos, como cálcio e magnésio, a partir da amostra PR-01, contribuindo para uma avaliação mais completa dessa amostra. Além disso, são necessários estudos em campo ou em casa de vegetação para comprovar a absorção desses elementos pelas plantas. O uso desse pó de rocha pode contribuir para a redução do uso de fertilizantes

convencionais, além de proporcionar um destino para o material de rejeito de mineração, resultando na diminuição das taxas de emissão de CO₂. Dessa forma, estudos como esses são essenciais para levar tecnologias de baixo carbono para o campo com o intuito de promover uma agricultura sustentável.

5 CONCLUSÕES

O pó de rocha oriundo de basalto possui um grande potencial para ser usado como remineralizador.

A dissolução dos minerais e liberação de elementos é lenta e contínua, o que é benéfico para evitar as perdas dos elementos.

A avaliação de novos elementos deve ser feita para um completo entendimento da dinâmica e liberação de macro e micronutrientes *in vitro*, bem como *in vivo*.

Novas pesquisas devem ser levadas à campo para analisar a eficiência agrônômica do pó de rocha oriundo de basalto e contribuir para o estabelecimento de tecnologias de baixas emissões de carbono, ou até mesmo tecnologias de descarbonização.

6 REFERÊNCIAS

ADELEKE, R.; NWANGBURUKA, C.; OBOIRIEN, B. Origens, papéis e destino dos ácidos orgânicos nos solos: uma revisão. **Suid-Afrikaanse tydskrif vir plantkunde [Jornal de botânica do sul da África]**, v. 108, p. 139. 393–406, 2017.

ASSUNÇÃO, R. D., CASSOL, P. C., GRANADOS, S. B., MAFRA, Á. L., & DE M BITTENCOURT, R. F. Microbial-inoculated remineralizers as source of potassium and other nutrients. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 2, fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n2e275193>. Acesso em: 19 jul. 2024.

BRASIL. **Instrução Normativa** nº 5, de 10 de março de 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-5-de-10-3-16-remineralizadores-e-substratos-para-plantas.pdf/view>. Acesso em: 26 Mai. 2024

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Lei** Nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2013/lei-12890-10-dezembro-2013-777603-publicacaooriginal-142208-pl.html>. Acesso em: 23 Jul. 2024.

BRASIL. **Ministério da Indústria Comércio Exterior e Serviços**. Governo Federal. ComexStat. Disponível em: <https://comexstat.mdic.gov.br/pt/comex-vis/4/562>. Acesso em: 17 jul. 2024.

CONCEIÇÃO, L. T.; SILVA, G. N.; HOLSBACK, H. M. S.; OLIVEIRA, C. F.; MARCANTE, N. C. Potential of basalt dust to improve soil fertility and crop nutrition. **Jornal de Agricultura e Pesquisa Alimentar**, Nova Andradina-MS, ano 2022, v. 10, n. 100443, p. 1, 1 dez. 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100443>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-agriculture-and-food-research>

CERRI, CARLOS EDUARDO PELLEGRINO et al. Estoques de carbono e fluxo de gases do efeito estufa em agrossistemas no Brasil. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. v.9. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316862417_Estoques_de_carbono_e_fluxo_de_gases_do_efeito_estufa_em_agrossistemas_no_Brasil. Acesso em: 17 jul. 2024.

DELANHESE, B. C. do N. S.; PACOBELLO, D. R.; SILVA, E. C. da; MINA FALSARELLA, O.; LONGO, R. M.; BENEDICTO, S. C. D. **Mudanças climáticas frente à sociedade, as indústrias e os setores econômicos**. *Latin American Journal of Business Management*, v. 15, n. 1, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.69609/2178-4833.2024.v15.n1.a741>. Acesso em: 17 jul. 2024.

EMBRAPA. **Intensificação e sustentabilidade dos sistemas de produção agrícolas**. <https://www.embrapa.br/visao/intensificacao-e-sustentabilidade-dos-sistemas-de-producao-agricolas>. Acesso em: 17 Jul. 2024.

FYFE, W. S.; PRICE, N. J.; THOMPSON, A. B. **Fluids in the Earth's Crust: Their Significance in Metamorphic, Tectonic and Chemical Transport Processes**. 1. ed. Amsterdã: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. 383 p.

GHEYI, H. R.; DIAS, N. da S.; LACERDA, C. F. de. **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal, 2016.

HUB IBERIA AGROTECH. **Sensores de condutividade elétrica do solo**. 2024. Disponível em: <https://learningdata.hubiberiaagrotech.eu/sensores-de-condutividade-eletrica-do-solo/>. Acesso em: 25 jul. 2024.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIA-USP. **Minerais**. Disponível em: <https://didatico.igc.usp.br/minerais/>. Acesso em 18 jul. 2024.

MHE- Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert. **Minerais**. Disponível em: <https://museuhe.com.br/minerais/>. Acesso em: 18 jul. 2024.

MACHADO, Ramires Ventura; ANDRADE, Felipe Vaz; PASSOS, Renato Ribeiro; RIBEIRO, Roberto Carlos da Conceição; MENDONÇA, Eduardo Sá; MESQUITA, Luiz Felipe. Characterization of Ornamental Rock Residue and Potassium Liberation Via Organic Acid Application. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, e0150217, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/MxXk8qrKjPFxTChdQmxg9tM/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 25 jul. 2024.

OLIVEIRA, P. S. D; ROCHA, W. S. D. da; MARTINS, C. E. Uso de pó de rocha em plantas forrageiras. Juiz de Fora: **Embrapa Gado de leite**, 2023. 16p. (Embrapa Gado de Leite. Comunicado Técnico, 96). Biblioteca(s): Embrapa Gado de Leite

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. Protocolo para avaliação da eficiência agrônômica de remineralizadores de solo – primeira versão. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 23p., 2019b.

VOLLHARDT, P.; SCHORE, N. E. **Química orgânica: estrutura e função**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1414 p. ISBN 9788565837323.