



**UFRRJ**  
**INSTITUTO DE AGRONOMIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA**

**DISSERTAÇÃO**

**Eficiência agronômica de remineralizadores no  
cultivo de milho em sistema de manejo orgânico e  
potencial de solubilização de K por ácidos orgânicos**

**Beatriz Gaspar de Aguiar**

**2024**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA**

**EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE REMINERALIZADORES NO  
CULTIVO DE MILHO EM SISTEMA DE MANEJO ORGÂNICO E  
POTENCIAL DE SOLUBILIZAÇÃO DE K POR ÁCIDOS ORGÂNICOS**

**BEATRIZ GASPAR DE AGUIAR**

*Sob a Orientação do Pesquisador*

**Ednaldo da Silva Araújo**

*e coorientação do Pesquisador*

**José Guilherme Marinho Guerra**

Dissertação submetida como  
requisito parcial para obtenção do grau  
de **Mestre em Fitotecnia**, no Curso de  
Pós-Graduação em Fitotecnia, Área de  
Concentração em Agroecologia

Seropédica, RJ

Setembro de 2024

Ficha catalográfica elaborada  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A282e Aguiar, Beatriz Gaspar de , 1994-  
Eficiência agronômica de remineralizadores no  
cultivo de milho em sistema de manejo orgânico e  
potencial de solubilização de K por ácidos orgânicos /  
Beatriz Gaspar de Aguiar. - Seropédica, 2024.  
97 f.

Orientador: Ednaldo da Silva Araújo.  
Coorientador: José Guilherme Marinho Guerra.  
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal  
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós Graduação em  
Fitotecnia (PPGF), 2024.

1. Remineralizadores. 2. Potássio. 3. Ácidos  
Orgânicos. 4. Fonolito. 5. Milho. I. Araújo, Ednaldo  
da Silva, 1974-, orient. II. Guerra, José Guilherme  
Marinho, -, coorient. III Universidade Federal Rural  
do Rio de Janeiro. Programa de Pós Graduação em  
Fitotecnia (PPGF). IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE AGRONOMIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA**

**BEATRIZ GASPAR DE AGUIAR**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Fitotecnia,  
no Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, área de Concentração em Agroecologia

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/09/2024**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** EDNALDO DA SILVA ARAUJO  
Data: 23/11/2024 20:05:45-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Ednaldo Da Silva Araújo. Dr. Embrapa Agrobiologia  
(Orientador)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** EVERALDO ZONTA  
Data: 22/11/2024 15:29:13-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Everaldo Zonta. Dr. UFRRJ

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** DAVID VILAS BOAS DE CAMPOS  
Data: 25/11/2024 15:37:31-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

David Vilas Boas de Campos. Dr. Embrapa Solos

## **AGRADECIMENTOS**

A toda minha família, amigos e companheira, pelo apoio e incentivo.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e todos os professores pelos aprendizados no decorrer do curso.

Aos funcionários que atuam na Fazendinha Agroecológica km 47 e no Terraço por todo o apoio nas atividades de campo.

Aos pesquisadores e funcionários da Embrapa Agrobiologia.

Aos colegas do Laboratório de Agricultura Orgânica da Embrapa Agrobiologia.

A realização do trabalho contou com o apoio financeiro do FNDCT/CT- AGRO/FINEP (Convênio 01.22.0080.00, Ref. 1219/21) e da FAPERJ (Ref. Processos E-26/290.003/2023 e E-26/211.633/2021).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001 (PORTARIA N° 206 DE 4 DE SETEMBRO DE 2018 DA CAPES).

## RESUMO GERAL

AGUIAR, Beatriz Gaspar de. **Eficiência agronômica de remineralizadores no cultivo de milho em sistema de manejo orgânico e potencial de solubilização de K por ácidos orgânicos.** 2024. 97p Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Instituto de Agronomia, Departamento Fitotecnia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

O Brasil é o quarto maior consumidor de fertilizantes do mundo e 96% dos fertilizantes potássicos de que necessita são importados, resultando em uma forte dependência externa. Uma possível alternativa, para reduzir a dependência externa, são os remineralizadores de solo provenientes da indústria de mineração como um rejeito que apresentam lenta solubilização de nutrientes. As doses, a eficiência e os fatores que aceleram a solubilização desses remineralizadores para as plantas, entretanto, ainda necessitam de pesquisa. Partindo dessa premissa, este trabalho tem duas hipóteses: 1) os remineralizadores são fontes eficientes de K para a cultura do milho, em manejo orgânico de produção; e 2) o uso de ácidos orgânicos (os mesmos ácidos produzidos por microrganismos e sistema radicular) aumenta a solubilidade de K contida nos remineralizadores. Diante disso, objetivou-se determinar a eficiência agronômica de remineralizadores no cultivo de milho e o potencial de solubilização de K por intermédio de ácidos orgânicos. As atividades experimentais foram divididas em duas etapas. O primeiro experimento foi instalado na área experimental da Embrapa Agrobiologia, em Seropédica, RJ. O delineamento experimental foi de blocos casualizados, com 20 tratamentos e 4 repetições. Os tratamentos consistiram em diferentes doses de três tipos de remineralizadores (fonolito hidrotermalizado com K<sub>2</sub>O total de 12%, fonolito com K<sub>2</sub>O total de 8% e siltito glauconítico com K<sub>2</sub>O total de 10%) combinadas com diferentes doses de sulfato de potássio (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Dentre os remineralizadores estudados, quanto à produtividade do milho, o fonolito apresentou resultados mais promissores do que o fonolito hidrotermalizado e o siltito glauconítico. Isso indica que o uso da adubação mista (remineralizador + sulfato de potássio) é uma prática viável, sugerindo que os remineralizadores têm potencial de substituição de parte das fontes convencionais de K pela utilização de rochas brasileiras e diminuição da dependência de uso de fertilizantes solúveis, apresentando, assim, uma solução para o suprimento da adubação potássica. A adubação com remineralizadores isoladamente não apresentou incremento na produtividade do milho em relação ao controle (sem adubação). Foi também realizado um experimento com milho em casa de vegetação, com diferentes doses de dois remineralizadores (fonolito hidrotermalizado e fonolito) de 0 até 100% do substrato total do vaso, com o objetivo

de testar os remineralizadores nas suas doses máximas e como substrato. O fonolito se mostrou mais eficiente, pois com menores quantidades conseguiu chegar a melhores produtividades e acúmulo de K na matéria seca. No entanto, o seu uso em dose muito alta pode ser prejudicial. Ao mesmo tempo, foi observado que, com o aumento de dosagem do fonolito hidrotermalizado, não houve danos para as produtividades, indicando que esse remineralizador pode até ser usado como substrato para o desenvolvimento das plantas. A segunda etapa experimental teve como objetivo testar a solubilidade dos remineralizadores com diferentes ácidos orgânicos. O experimento foi realizado na Embrapa Agrobiologia, em Seropédica, RJ. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com quatro repetições, em esquema fatorial 3x5, onde o primeiro fator correspondeu aos remineralizadores (fonolito, fonolito hidrotermalizado e siltito glauconítico) e o segundo representou cinco tempos de agitação (1; 3; 5; 8 e 16 horas a 80 oscilações por minuto). O experimento foi realizado quatro vezes, uma para cada tipo de extrator: ácido cítrico ( $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ ); ácido acético ( $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ ); ácido lático ( $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ ); e água. Concluiu-se que é possível aumentar a disponibilidade de K presente no fonolito com ácidos orgânicos. Em ácido cítrico, o fonolito apresentou solubilização de  $83,97 \text{ mg K}_2\text{O.L}^{-1}$ , que corresponde a 0,84%, em contraste com a água, que obteve  $2,32 \text{ mg K}_2\text{O.L}^{-1}$ , que representa 0,023% de solubilização.

**Palavras-chave:** Remineralizadores; Potássio; Ácidos Orgânicos; Fonolito, Fonolito hidrotermalizado; Siltito glauconítico.

## GENERAL ABSTRACT

AGUIAR, Beatriz Gaspar de. **Agronomic efficiency of remineralizers in corn cultivation in an organic management system and K solubilization potential by organic acids.** 2024. 97p Dissertation (Master in phytotechnics). Institute of Agronomy, Phytotechnics Department, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

Brazil is the fourth largest consumer of fertilizers in the world, and 96% of the potassium fertilizers it needs are imported, resulting in a strong external dependency. One possible alternative to reduce this dependence is soil remineralizers from the mining industry as a byproduct, which exhibit slow nutrient solubilization. However, the doses, efficiency, and factors that accelerate the solubilization of these remineralizers for plants still require further research. Based on this premise, this study has two hypotheses: 1) remineralizers are efficient sources of potassium (K) for corn in organic production management; and 2) the use of organic acids (the same acids produced by microorganisms and the root system) increases the solubility of K in remineralizers. Therefore, the objective was to determine the agronomic efficiency of remineralizers in corn cultivation and the potential of K solubilization through organic acids. The experimental activities were divided into two phases. The first experiment was conducted at the experimental area of Embrapa Agrobiologia in Seropédica, RJ. The experimental design was a randomized block design with 20 treatments and 4 replications. The treatments consisted of different doses of three types of remineralizers (hydrothermally phonolite with 12% total K<sub>2</sub>O, phonolite with 8% total K<sub>2</sub>O, and glauconitic siltstone with 10% total K<sub>2</sub>O) combined with different doses of potassium sulfate (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Among the remineralizers studied, in terms of corn productivity, phonolite showed more promising results than hydrothermally phonolite and glauconitic siltstone. This suggests that mixed fertilization (remineralizer + potassium sulfate) is a viable practice, indicating that remineralizers have the potential to replace part of the conventional sources of K by using Brazilian rocks and reducing dependence on soluble fertilizers, thus providing a solution for potassium fertilization supply. Fertilization with remineralizers alone did not result in increased corn productivity compared to the control (no fertilization). A second experiment was conducted with corn in a greenhouse, using different doses of two remineralizers (hydrothermally phonolite and phonolite) ranging from 0 to 100% of the total substrate in the pot, with the aim of testing the maximum doses of the remineralizers and their use as substrate. Phonolite proved to be more efficient, as smaller quantities resulted in better productivity and K accumulation in dry matter. However, its use at very high doses

could be harmful. At the same time, it was observed that increasing the dosage of hydrothermally phonolite did not harm productivity, indicating that this remineralizer could even be used as a substrate for plant development. The second experimental phase aimed to test the solubility of the remineralizers with different organic acids. The experiment was conducted at Embrapa Agrobiologia in Seropédica, RJ. The experimental design was completely randomized with four replications, in a 3x5 factorial scheme, where the first factor corresponded to the remineralizers (phonolite, hydrothermally phonolite, and glauconitic siltstone), and the second represented five agitation times (1, 3, 5, 8, and 16 hours at 80 oscillations per minute). The experiment was conducted four times, once for each type of extractor: citric acid ( $0.02 \text{ mol L}^{-1}$ ); acetic acid ( $0.02 \text{ mol L}^{-1}$ ); lactic acid ( $0.02 \text{ mol L}^{-1}$ ); and water. It was concluded that it is possible to increase the availability of K present in phonolite with organic acids. In citric acid, phonolite showed solubilization of  $83.97 \text{ mg K}_2\text{O.L}^{-1}$ , which corresponds to 0.84%, in contrast to water, which resulted in  $2.32 \text{ mg K}_2\text{O.L}^{-1}$ , representing 0.023% solubilization.

**Keywords:** Remineralizers; Potassium; Organic Acids; Phonolite; Hydrothermally Phonolite; Glauconitic Siltstone.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Classificação, tipo de rocha, nome comercial e principal formulação química dos remineralizadores registrados no MAPA. Fonte: Embrapa, disponível em: <a href="https://www.gov.br/agricultura/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/consultas-publicas/2022/arquivos-das-consultas-publicas/NTPosdeRocha.pdf">https://www.gov.br/agricultura/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/consultas-publicas/2022/arquivos-das-consultas-publicas/NTPosdeRocha.pdf</a> .....	10
<b>Tabela 2.</b> Composição dos remineralizadores: fonolito, fonolito hidrotermalizado e siltito glauconítico. Fonte: Rótulo dos produtos.....	17
<b>Tabela 3.</b> Distribuição da área plantada, produtividade e produção de milho no Brasil. Fonte: Conab 2024.....	26
<b>Tabela 4.</b> Extração média de nutrientes pela cultura do milho. Fonte: Cruz et al. (2008) .....	27
<b>Tabela 5.</b> Análise química da fertilidade do solo determinada nas amostras de terra da área experimental .....	32
<b>Tabela 6.</b> Tratamentos usados no experimento.....	33
<b>Tabela 7.</b> Teor de nutrientes presentes na torta de mamona.....	34
<b>Tabela 8.</b> Produtividade de fitomassa seca, espigas com palha, diâmetro da espiga e grãos de milho cultivado em sistema orgânico de produção com uso diferentes doses de remineralizadores e sulfato de potássio. ....	36
<b>Tabela 9.</b> Teores de nitrogênio, potássio, magnésio, fosforo e cálcio na matéria seca da planta de milho cultivado em sistema orgânico de produção com uso diferentes doses de remineralizadores e sulfato de potássio .....	40
<b>Tabela 10.</b> Teores de fósforo, potássio, magnésio e cálcio nas folhas índices das plantas de milho.....	44
<b>Tabela 11.</b> Acúmulo de potássio nas plantas e grão de milho cultivado em sistema orgânico de produção com uso diferentes doses de remineralizadores e sulfato de potássio .....	45
<b>Tabela 12.</b> Análise do solo utilizado no experimento de vasos.....	47
<b>Tabela 13.</b> Composição da solução de micronutrientes. Referência: FRANCO, Avílio A.; DÖBEREINER, Johanna. Especificidade hospedeira na simbiose com Rhizobium-Feijão e influência de diferente nutrientes. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 2, n. 1, p. 467-474, 1967. ....	47
<b>Tabela 14.</b> Produção de massa seca da parte aérea, da raiz, altura e diâmetro das plantas de milho cultivadas em vasos usando remineralizadores como substrato.....	48

<b>Tabela 15.</b> Teor de nutrientes (K, Ca, Mg e P) na parte aérea das plantas de milho cultivadas em vasos usando remineralizadores como substrato .....	49
<b>Tabela 16.</b> Valores de pH e condutividade elétrica das soluções solventes utilizadas no experimento .....	61
<b>Tabela 17.</b> Valores de pH e condutividade elétrica dos diferentes remineralizadores em água destilada .....	61
<b>Tabela 18.</b> Teores de potássio, cálcio, magnésio e fósforo solubilizados em água destilada nos diferentes remineralizadores.....	62
<b>Tabela 19.</b> Valores de pH e condutividade elétrica dos diferentes remineralizadores em ácido acético .....	64
<b>Tabela 20.</b> Teores de potássio, cálcio, magnésio e fósforo solubilizados em ácido acético nos diferentes remineralizadores.....	65
<b>Tabela 21.</b> Valores de pH e condutividade elétrica dos diferentes remineralizadores em ácido lático. ....	67
<b>Tabela 22.</b> Teores de potássio, cálcio, magnésio e fósforo solubilizados em ácido lático nos diferentes remineralizadores.....	68
<b>Tabela 23.</b> Valores de pH e condutividade elétrica dos diferentes remineralizadores em ácido cítrico .....	70
<b>Tabela 24.</b> Teores de potássio, cálcio, magnésio e fósforo solubilizados em ácido cítrico nos diferentes remineralizadores .....	71
<b>Tabela 25.</b> Soma de bases e K <sub>2</sub> O dos diferentes remineralizadores em ácido cítrico e em água destilada com suas respectivas porcentagens .....	74
<b>Tabela 26.</b> Análise da terra utilizada como substrato para os vasos.....	86
<b>Tabela 27.</b> Análise do solo da área experimental .....	87
<b>Tabela 28.</b> Análise de nutrientes do resíduo de cervejaria .....	88
<b>Tabela 29.</b> Análise de nutrientes do resíduo de cervejaria .....	90

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Mapa tectônico da região Sudeste do Brasil. Fonte BACHA et al. (2020) .....	18
<b>Figura 2:</b> Composição geológica do planalto de Poço de Caldas, MG. Fonte BACHA et al. (2020) .....	18
<b>Figura 3.</b> Produtividade de grão de milho de acordo com as doses de K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	38
<b>Figura 4.</b> Teor de K, Mg e Ca na parte aérea do milho .....	41
<b>Figura 5.</b> Relação da produtividade de grãos de milho com o teor de potássio na parte aérea da planta .....	42
<b>Figura 6.</b> Gráfico de teor de potássio de acordo com doses crescentes de K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	43
<b>Figura 7.</b> Massa seca da parte aérea das plantas de milho em função das porcentagens de remineralizador aplicado .....	50
<b>Figura 8.</b> Massa seca do sistema radicular das plantas de milho em função das porcentagens de remineralizador aplicado .....	51
<b>Figura 9.</b> Alturas das plantas de milho em função das porcentagens de remineralizadores adicionadas .....	52
<b>Figura 10.</b> Teor de potássio na parte aérea das plantas de milho .....	53
<b>Figura 11.</b> Teor de cálcio na parte aérea das plantas de milho.....	54
<b>Figura 12.</b> Teor de Magnésio na parte aérea das plantas de milho.....	54
<b>Figura 13.</b> Teor de fósforo na parte aérea das plantas de milho.....	55
<b>Figura 14.</b> Gráfico da solubilização do potássio dos diferentes remineralizadores em água destilada .....	63
<b>Figura 15.</b> Gráfico da solubilização do potássio dos diferentes remineralizadores em ácido acético .....	66
<b>Figura 16.</b> Gráfico da solubilização do potássio dos diferentes remineralizadores em ácido lático .....	69
<b>Figura 17.</b> Gráfico da solubilização do potássio dos diferentes remineralizadores em ácido cítrico .....	72
<b>Figura 18.</b> Solubilização de potássio no fonolito com as soluções de ácido cítrico, lático, acético e com água destilada .....	73

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>7</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1. Remineralizadores, pó de rocha e agrominerais .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.1. Rochagem e remineralizadores de solo .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.2. Eficiência agronômica do uso de remineralizadores .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.3. Fonolito, Fonolito hidrotermalizado e Siltito glauconítico .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2. Intemperismo .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3. Potássio (K).....</b>	<b>20</b>
<b>2.4. Biossolubilização .....</b>	<b>21</b>
<b>2.5. Ácidos Orgânicos .....</b>	<b>22</b>
<b>2.6. Agricultura Orgânica .....</b>	<b>23</b>
<b>2.7. Cultura do Milho .....</b>	<b>24</b>
<b>3. CAPÍTULO I .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1. RESUMO .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2. ABSTRACT .....</b>	<b>29</b>
<b>3.3. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>31</b>
<b>A) EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE REMINERALIZADORES NO CULTIVO DE MILHO VERDE SOB O MANEJO ORGÂNICO EM CONDIÇÕES DE CAMPO .....</b>	<b>32</b>
<b>3.4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>32</b>
<b>3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>35</b>
<b>B) EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE REMINERALIZADORES NO CULTIVO DE BIOMASSA DE MILHO EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO .....</b>	<b>46</b>
<b>3.6. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>46</b>
<b>3.7. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>48</b>
<b>3.8. CONCLUSÕES .....</b>	<b>55</b>
<b>4. CAPÍTULO II .....</b>	<b>56</b>
<b>4.1. RESUMO .....</b>	<b>56</b>
<b>4.2. ABSTRACT .....</b>	<b>57</b>
<b>4.3. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>58</b>

<b>4.4. SOLUBILIDADE DOS REMINERALIZADORES EM DIFERENTES ÁCIDOS ORGÂNICOS .....</b>	60
<b>4.4.1. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	60
<b>4.4.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	61
<b>4.4.3. CONCLUSÕES .....</b>	74
<b>5. CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	75
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	75
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	77
<b>8. ANEXO I .....</b>	86
<b>9. ANEXO II.....</b>	87
<b>10. ANEXO III.....</b>	89

## **1.INTRODUÇÃO GERAL**

Segundo o MAPA (2022), o Brasil é o quarto maior consumidor de fertilizantes do mundo, sendo responsável por cerca de 8% do consumo global desses produtos. Oitenta por cento dos fertilizantes utilizados na agricultura brasileira são importados e, destes, 96% dos fertilizantes potássicos são importados, resultando num problema para o país, pois é gerada uma forte dependência externa em um mercado dominado por poucos fornecedores.

Além de causar aumento dos custos de produção, essa dependência torna a agricultura vulnerável às oscilações do mercado externo, diminuindo, assim, também, a competitividade dos produtos agrícolas (Alves et al., 2021).

Outra questão de suma importância é referente à capacidade de solubilização desses fertilizantes, que favorece a lixiviação e pode causar danos ambientais relacionados à poluição e contaminação dos solos, cursos hídricos e fauna.

Com vistas à menor dependência externa de fertilizantes, criou-se o decreto nº10.605 de 22 de janeiro de 2021, que trata do Plano Nacional de Fertilizantes, com a finalidade de fortalecer políticas de fomento da produção e distribuição de fertilizantes no Brasil de forma sustentável. Deste modo, busca-se aumentar a produção nacional, o desenvolvimento de tecnologias direcionadas para as condições tropicais da agricultura brasileira e a formação de técnicos, assim como políticas e ações econômicas que resultem em uma estabilidade dos custos.

O Brasil dispõe de reservas de minerais potássicos de baixa solubilidade, especialmente na forma de rochas silicáticas (Martins et al. 2010). Porém, a utilização dessas fontes exige o desenvolvimento de rotas tecnológicas de transformação capazes de torná-las fontes eficientes de fertilizantes (Luz et al. 2010). A utilização direta do pó de rochas silicáticas também pode ser uma alternativa viável, em termos econômicos e ecológicos, visto seu baixo custo de produção (Martins et al. 2007). Dependendo das características mineralógicas das rochas de origem, esses materiais apresentam solubilidade lenta, porém, fornecem também outros macros e micronutrientes presentes em sua composição, sendo que alguns ainda possuem propriedades favoráveis para se elevar o pH do solo (Lapido-Loureiro & Nascimento 2008).

Os remineralizadores foram inseridos no Plano Nacional de Fertilizantes por serem considerados uma possível alternativa aos fertilizantes potássicos utilizados e de produção nacional. Os remineralizadores são parte de uma categoria específica de insumo agrícola, estabelecida pela legislação dos fertilizantes, e sua definição, de acordo com a Lei nº

12.890/2013 (Brasil, 2013), é que se trata de todo material que tenha sofrido apenas processos de redução de tamanho de partículas, e que altere os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promova a melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas ou da atividade biológica do solo.

Na literatura são encontrados diversos artigos científicos sobre o uso dos remineralizadores, contudo, em função da diversidade de rochas e de culturas, não há consenso na comunidade científica sobre a eficiência destes produtos. Partindo dessa premissa, este trabalho tem duas hipóteses: 1) os remineralizadores são fontes eficientes de K para a cultura do milho, em manejo orgânico de produção e 2) o uso de ácidos orgânicos (os mesmos ácidos produzidos por microrganismos e sistema radicular) aumentam a solubilidade de K contida nos remineralizadores. Diante disso, objetivou-se determinar a eficiência agronômica de remineralizadores no cultivo de milho e o potencial de solubilização de K por intermédio de ácidos orgânicos.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Remineralizadores, pó de rocha e agrominerais**

Existem três terminologias diferentes que podem ser confundidas e convém diferenciar: pó de rocha, agromineral e remineralizador. O pó de rocha é o produto proveniente de qualquer rocha apresentada na forma de pó. Resulta de uma sequência de etapas de britagem, moagem e classificação por tamanho de partículas e pode ser definido por partículas extremamente pequenas e leves suspensas no ar ou que se depositam sobre as coisas. No entanto, nem todos os pós de rocha podem ser utilizados na agricultura. Somente os que têm eficiência comprovada e teores de metais pesados abaixo dos limites estabelecidos pela legislação. Os agrominerais, por sua vez, são todos os materiais de origem mineral que possuem registro no MAPA e que podem ser utilizados na agricultura de forma eficiente e segura, como por exemplo, o calcário e as rochas fosfáticas. Quanto aos remineralizadores, são agrominerais que fazem parte de uma categoria específica de insumo agrícola estabelecida pela legislação dos fertilizantes. A sua definição, de acordo com a Lei nº 12.890/2013 (Brasil, 2013), é de que se trata de todo material que tenha sofrido apenas processos de redução de tamanho de partículas, e que altere os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promova a melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas ou da atividade biológica do solo.

### **2.1.1. Rochagem e remineralizadores de solo**

Rochagem é uma técnica de fertilização baseada na adição de pó de determinados tipos de rocha ou minerais com a capacidade de alterar positivamente a fertilidade dos solos sem afetar o equilíbrio do ambiente. Já é praticada há vários anos e tem como exemplos as práticas agrícolas da calagem e da fosfatagem (MEERT et al., 2009). É visto como um processo alternativo ou complementar da fertilização. Dentre algumas vantagens atribuídas à rochagem, é possível citar o fornecimento simultâneo de vários nutrientes, devido à composição variada dos agrominerais e à disponibilização de nutrientes de forma mais gradual. Incluir estes agrominerais nas práticas de adubação pode tornar-se uma estratégia para elevar a fertilidade do solo e torná-lo mais produtivo, possibilitando a redução do uso de fertilizantes solúveis convencionais e dos riscos ambientais inerentes ao seu uso. Também pode haver redução nos custos de produção, principalmente para pequenos produtores. Sendo assim, alguns autores preconizam a substituição de parte das fontes convencionais por fontes contendo remineralizadores, por meio da rochagem, sem interferir na produtividade dos cultivos.

A tecnologia da rochagem começou a ganhar força na década de 1950 por meio de ações difundidas por Josué Guimarães e Vlademir Ilchenko, em Minas Gerais. Posteriormente, o professor Othon Leonards, da UnB, um entusiasta da rochagem no país, fez diversas pesquisas relacionadas ao tema. Assim surgiu o interesse em testar diferentes tipos de rochas brasileiras nos seus aspectos geoquímicos, agronômicos, social e ambiental (I Congresso nacional de rochagem, 2010). Também foi criado o congresso nacional de rochagem, justamente, com o objetivo de agregar e discutir as pesquisas desenvolvidas em relação ao tema. Em função da maior carência de P e K nos solos brasileiros, os estudos com rochas foram direcionados principalmente para esses dois nutrientes e para rotas alternativas para obtenção dos fertilizantes.

Existem rochas que apresentam, em sua composição, potássio, fósforo, cálcio, magnésio e enxofre, além de alguns micronutrientes e elementos que são benéficos para as plantas, como o silício (STRAATEN, 2006).

O principal desafio no uso de agrominerais como fertilizantes é fornecer os nutrientes nas quantidades e no tempo adequado a cada cultura. A necessidade de usar doses altas e com granulometria bem fina, para balancear a baixa concentração e a solubilidades destes materiais, pode aumentar os custos (STRAATEN, 2006).

Por outra perspectiva, a baixa solubilidade dos agrominerais é uma qualidade importante em um fertilizante, principalmente, em locais tropicais, com alta frequência de chuvas fortes, impedindo que os nutrientes sejam lixiviados e perdidos e evitando danos ao meio ambiente (Leonardos, Theodoro e Assad, 2000).

Os remineralizadores são geralmente obtidos a partir de rochas silicáticas. Entretanto, por serem de dissolução lenta e complexa, a utilização de remineralizadores depende de diversos fatores, como granulometria, composição química e mineralógica da rocha, pH e atividade biológica do solo (DETTMER et al., 2019). Devido à sua solubilização lenta, acredita-se que a sua aplicação permaneça por alguns anos no solo sem necessidade de adubação potássica.

A Tabela 1 reúne informações sobre remineralizadores registrados no Ministério da Agricultura disponíveis no Brasil.

**Tabela 1.** Classificação, tipo de rocha, nome comercial e principal formulação química dos remineralizadores registrados no MAPA. Fonte: Embrapa disponível em:

<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/consultas-publicas/2022/arquivos-das-consultas-publicas/NTPosdeRocha.pdf>

Classificação	Rocha	Nome comercial	Soma de bases (CaO+MgO+K <sub>2</sub> O)	K <sub>2</sub> O	Sílica livre %
Remineralizador	Granulito	RMS-C01	9,9	3,9	17
Remineralizador	Mica xisto	FMX	9,5	3,2	20
Material Secundário	Mica xisto	Pó de micaxisto	9,6	3,3	26
Remineralizador	Calcixisto	REMAX	23	2,7	20
Remineralizador	Basalto	Pó de rocha Goyaz britas	11,5	3,5	NI
Material Secundário	Mica xisto	Pó de micaxisto	8,9	4	25
Remineralizador	Kamafugito	KP-Fértil	11	3	0
Remineralizador	Anfibolito	-----	12,5	2	10
Remineralizador	Serpentinito + fonolito	-----	35	1	0
Remineralizador	Siltito glauconítico	K-Forte	13	10	13
Remineralizador	Fonolito	Ekosil	10	8	0
Remineralizador	Fonolito hidrotermalizado	Potasil	12	12	0
Remineralizador	Basalto	-----	12,65	1,83	5
Remineralizador	Basalto	Pó de rocha ICA	12	1	0
Remineralizador	Basalto	Renutra	13	1,01	0
Remineralizador	Microgabro + dacito	Mineralle Agro	14	1,4	10
Remineralizador	Serpentinito + filito	Silmag	26	1,2	15
Remineralizador	Diabásio	Reminer GS3	14	1,4	0
Material Secundário	Basalto	Pó de basalto	16,6	1,2	0
Remineralizador	Dacito	Reminer K+	9	3,5	18
Material Secundário	Gnaisse	Pó de gnaisse	5,8	4,6	37
Remineralizador	Biotita gnaisse diorítico.	Pó de biotita Gnaisse Diorito	11	3	NI

As rochas silicáticas, caracterizadas por terem, em sua composição, predominantemente, minerais de silicato ( $\text{SiO}_4$ ), são bastante comuns e apresentam uma ampla distribuição, como, por exemplo, feldspato, quartzo, mica e olivina, entre outros. Existem três tipos de rochas silicáticas: ígneas – formadas pelo resfriamento e solidificação do magma; metamórficas – formadas a partir da transformação de rochas preexistentes devido à pressão e temperatura; e sedimentares – formadas pela consolidação de sedimentos. As rochas magmáticas alcalinas são as que chamam mais atenção para utilização como agrominerais, pois, em sua composição, há minerais com alta concentração de potássio. Alguns exemplos desses minerais são: carnalita, biotita, leucita, feldspato potássico e muscovita (MARTINS et al., 2008).

Uma das formas de obtenção de diferentes agrominerais usados na rochagem é o aproveitamento dos subprodutos de mineração, que são classificados como passivos ambientais pela maioria das empresas que os produzem (MARTINS et al., 2008). Um uso mais nobre para estes resíduos seria uma solução tanto ambiental como operacional e socioeconômica, facilitando sua obtenção e processos produtivos. A rochagem pode então ser vista como uma alternativa aos fertilizantes importados, sendo mais econômica e acessível, de aproveitamento ambientalmente correto quanto a um determinado passivo ambiental, além de apresentar um balanço energético favorável.

### **2.1.2. Eficiência agronômica do uso de remineralizadores**

A eficiência agronômica depende da interação de diferentes fatores como características dos agrominerais (mineralogia, química, granulometria e solubilidade), características e propriedades do solo (pH, textura, conteúdo de matéria orgânica, presença de microrganismos, umidade), características da cultura (espécie, ciclo, exigência nutricionais), fatores ambientais e de manejo.

Os resultados obtidos em um estudo realizado por Souza et al. (2017), onde foi utilizado um remineralizador oriundo de resíduo de rochas vulcânicas máfico-ultramáficas, compostas por biotita gnaisse e anfibolito, em experimento de casa de vegetação com milheto, na dose de  $6.000 \text{ kg.ha}^{-1}$ , proporcionaram efeitos compatíveis com a fonte solúvel de K ( $360 \text{ kg.ha}^{-1}$  de KCl), e os índices de eficiência de uso foram compatíveis com os obtidos com a aplicação de KCl.

Nos resultados obtidos por Zhao et al. (2019), que usaram produtos minerais silicáticos, definidos como fertilizantes fabricados a partir de rochas contendo K, como o granito, nefelina

e feldspato, foram observados efeitos na manutenção da produtividade das culturas, semelhantes ou até superiores aos do KCl. Por outro lado, devido ao conteúdo muito baixo de K existente nestes produtos, foi verificado que eles devem ser aplicados em um volume muito maior do que o fertilizante convencional, o que gera custos mais elevados. Ao mesmo tempo, a aplicação combinada (50:50) dos fertilizantes de rochas silicáticas com K convencional revelou-se promissora para reduzir custos e obter um bom sinergismo na produtividade.

Os feldspatos, em geral, têm o K fortemente retido na sua estrutura cristalina, o que os torna, segundo Melo, Castilhos e Pinto (2009), insolúveis aos ácidos fracos que ocorrem normalmente na natureza, dificultando seu uso agrícola como fonte de K em função de sua resistência ao intemperismo. Neste caso, uma granulometria mais fina passa a ser fator preponderante à eficiência da rocha como fonte de nutrientes em curto prazo. A teoria apresentada por Melo, Castilhos e Pinto (2009) contrapõe-se a alguns resultados positivos com o uso do fonolito, gerando dúvidas quanto à eficiência do material, motivo para a realização de novas pesquisas, visando obter maior entendimento do seu efeito fertilizante.

No trabalho de Torqueti et al. (2016), foi utilizado, como fonte de potássio, a glauconita ( $K_2O$  total 7,52%) e o organomineral de glauconita com esterco de galinha na adubação de girassol. Os autores concluíram que a baixa concentração e solubilidade dos nutrientes em rochas e minerais podem limitar o uso de fontes alternativas para atender à demanda requerida pela floricultura. Com o objetivo de reduzir o uso de fertilizantes convencionais e, consequentemente, reduzir a dependência internacional, a glauconita com granulometria fina e na forma de um fertilizante organomineral poderia ser uma alternativa na produção e durabilidade pós-colheita do girassol ornamental. O KCl apresentou superioridade no efeito sobre o desenvolvimento dos caules das flores, mas a qualidade final do girassol ornamental, quando cultivado com fontes alternativas de potássio, atende aos padrões de qualidade e requisitos do mercado consumidor. A combinação da glauconita com o esterco proporcionou uma melhora no fertilizante, pois a matéria orgânica presente, assim como os microrganismos, aceleraram o processo de intemperismo da rocha.

De acordo com Santos et al. (2016), a rocha verdete não tratada não teve efeitos na oferta de K para o milho. O verdete acidificado e o calcinado ( $CaCl_2$ ) mostraram eficiência semelhante ao KCl. Assim o tratamento térmico com  $CaCl_2$  e o tratamento químico com ácido modificaram a composição do verdete de minerais de K insolúvel para minerais de K solúveis. Estas transformações são importantes para o desempenho agronômicos dos fertilizantes e estes tratamentos foram eficientes para aumentar a disponibilidade de K para as plantas.

Ciceri et al. (2019) compararam a utilização de pó de rocha in natura, pó de rocha hidrotermal e KCl por meio de um bioensaio com amônio na cultura do tomate. O pó de rocha hidrotermal foi obtido a partir da alteração hidrotermal de rocha de feldspato potássico (sienito ultrapotássico) em condições alcalinas. Para aplicações de até 800 mg K kg<sup>-1</sup> de meio, o peso fresco obtido com o material hidrotermal foi igual ou superior ao do KCl. A formação de lesões devido à deficiência de potássio, induzida por amônio, foi suprimida com todas as aplicações de KCl ou material hidrotermal, mas apenas com as maiores aplicações de pó de rocha in natura. A concentração de K na planta foi maior nas plantas cultivadas com KCl e aumentou com aplicações maiores, enquanto não houve aumento no K das folhas com o pó de rocha in natura. Grandes aplicações de material hidrotermal causaram aumento considerável de K nas folhas. A solubilidade do material hidrotermal (~79 g K kg<sup>-1</sup> água) é menor do que a do KCl (~340 g K kg<sup>-1</sup> água), sendo possível concluir que o material hidrotermal promoveu o crescimento das plantas de tomate nas condições do bioensaio com amônio e, portanto, que tem o potencial de ser uma fonte alternativa de K agrícola. O material in natura não resultou em aumento de K nas folhas do tomate.

No trabalho de Boldrin et al. (2019), foram avaliados os efeitos de três fontes de K (glauconita *in natura*, glauconita calcinada granulada e glauconita calcinada em pó) em quatro doses de K (0, 205, 410 e 820 mg dm<sup>-3</sup>) e de cloreto de potássio (KCl) em uma dose de K (410 mg dm<sup>-3</sup>) sobre o crescimento das partes aéreas das plantas de lírios e sobre a composição de nutrientes em dois substratos (solo natural e solo adicionado com 30% (v/v) de esterco de gado). Foi concluído que o uso de glauconita *in natura* não proporciona um bom crescimento das plantas de lírio. A glauconita calcinada granulada e a glauconita calcinada em pó na dose de 410mg.dm<sup>-3</sup> foram equivalentes ao efeito sobre o crescimento das plantas causado pelo tratamento com KCl. A utilização de esterco de gado no substrato de cultivo levou a melhorias no crescimento do lírio.

Utilizando dois solos de textura contrastante em um ambiente controlado, Boldrin et al. (2020) avaliaram a viabilidade agronômica do uso de glauconita calcinada e fonolito misturados e granulados com dois materiais orgânicos sobre o crescimento do milho em vasos. Além dos dois solos de textura contrastante, foram testadas oito fontes de potássio: fonolito; fonolito + esterco de aves; fonolito + esterco de gado; glauconita calcinada; glauconita calcinada + esterco de aves; glauconita calcinada + esterco de gado; controle negativo (sem K); e controle positivo (K - KCl). No solo arenoso, a fonte composta por fonolito + esterco de frango teve efeito semelhante ao efeito da aplicação de KCl, quanto à altura das plantas, diâmetro do caule e massa

seca da parte aérea. Quanto ao solo argiloso, quando ambas as rochas foram misturadas com os resíduos orgânicos, o efeito foi semelhante ao do KCl para massa seca da parte aérea. O uso de rochas granuladas puras, glauconita calcinada e fonolito sem mistura com os resíduos orgânicos não foi eficiente para fornecer K disponível para as plantas de milho.

Ribeiro et al. (2010) avaliaram o efeito da aplicação de pó das rochas silicáticas ultramáfica alcalina e brecha piroclástica no plantio de soja. O pó dessas rochas se mostrou promissor como fonte de K, comparativamente à aplicação de KCl, e com efeito linear de aumento da dose com o aumento de concentração de K trocável.

Tavares et al. (2018) avaliaram o uso de fonolito no cultivo de braquiária e se o uso de compostagem aumenta a solubilidade de K, usaram como tratamentos: 1-controle; 2- composto enriquecido com pó de rocha a 10%; 3-composto misturado com pó de rocha a 10%; 4-somente pó de rocha; 5-somente composto. Em comparação com o controle, as fontes minerais influenciaram positivamente a produtividade, bem como os teores de K e Si na parte aérea do capim-braquiária e a liberação de nutrientes no solo. As aplicações conjuntas de fonolito em pó com compostos orgânicos foram as que melhor promoveram a bioliberação total de nutrientes para o solo. A aplicação conjunta de fonolito em pó com compostos orgânicos, seja como componente inicial na pilha de compostagem ou como aditivo aos compostos estabilizados, é uma estratégia que indica haver melhoria na bioliberação de nutrientes da fonte mineral. A aplicação de fonolito isoladamente não apresentou diferença significativa no teor de K da braquiária em relação ao controle. A bioliberação de potássio do fonolito isoladamente teve diferença significativa em relação ao controle, mas foi significativamente mais baixa em relação ao composto isoladamente.

Contrariamente aos efeitos positivos, diferentes autores, como Santos et al. (2016), Ciceri et al. (2019), Boldrin et al. (2019), Boldrin et al. (2020) e Tavares et al. (2018) relatam que a adubação potássica com remineralizadores isoladamente não é eficiente para o suprimento nutricional de diferentes culturas.

Dias (2022) conduziu uma revisão sistemática da literatura utilizando uma meta-análise com o objetivo de avaliar a eficiência do pó de rochas silicáticas como fonte de K para plantas cultivadas por meio da síntese de trabalhos. Dos 161 estudos selecionados, apenas 43 atenderam a todos os critérios de elegibilidade. Foi concluído que, para doses de até 5.000 kg ha<sup>-1</sup> de pó de rocha, os efeitos observados foram menos pronunciados. Neste caso, houve aumento de 12% na produção de biomassa e de 25% no acúmulo de K. A aplicação de até 5.000 kg ha<sup>-1</sup> de rocha ultramáfica proporcionou acréscimo de 56% sobre a produção de biomassa e de 69% sobre o

acúmulo de K em relação ao controle, sem aplicação de K. Não foi observado efeito significativo da aplicação de rochas moídas em granulometria superior a 2 mm. Já a aplicação de doses superiores a 5.000 kg ha<sup>-1</sup> em granulometria inferior a 0,3 mm incrementou em 84% a produção de biomassa e em 351% no acúmulo de K em relação ao controle negativo. Quando a aplicação de fertilizante solúvel foi considerada como tratamento de referência, a aplicação de pó de rocha silicática proporcionou efeito médio de -16% na produção de biomassa e de -47% no acúmulo de K, para todas as doses. Em todas as condições de dose e granulometria, a aplicação de pó de rocha proporcionou produção de matéria seca e acúmulo de K inferiores às proporcionadas pela aplicação de fertilizante solúvel. Porém, o pó de rocha silicática deve ser aplicado apresentando granulometria inferior a 0,3 mm e de origem máfica ou ultramáfica. Para todas as variáveis avaliadas, embora a aplicação de pó de rocha silicática tenha efeitos positivos, em relação à não aplicação de K, estes efeitos são significativamente inferiores aos proporcionados pela aplicação de fertilizante convencional solúveis na produção de matéria seca e acúmulo de K. A conclusão é que o pó de rocha silicática não é um substituto potencial dos fertilizantes solúveis convencionais.

### **2.1.3. Fonolito, fonolito hidrotermalizado e siltito glauconítico**

No presente trabalho, foram utilizados três remineralizadores oriundos de três diferentes rochas, o fonolito, o fonolito hidrotermalizado e o siltito glauconítico, tendo sido escolhidos por serem os remineralizadores registrados no MAPA com maior teor de K<sub>2</sub>O.

São numerosas as ocorrências de fonolitos no país, associadas a complexos alcalinos. Entre as ocorrências mais conhecidas e melhor estudadas, está a de Poços de Caldas, MG (Cortes et al., 2009). O planalto de Poços de Caldas, no sul de Minas Gerais, apresenta forma circular, área de 800km<sup>2</sup> e possui grande diversidade de minérios (Figura 1 e 2), com destaque para rochas enriquecidas em potássio. A mineração Curimba extrai uma rocha vulcânica alcalina como subproduto na mineração de bauxita, o fonolito. De acordo com a classificação de Johannsen (1959), os fonolitos são rochas de textura fina, sacaroidais a afaníticas, desde vítreas até microcristalinas de cores verde a preto (CORTES et al., 2010). O fonolito é uma alternativa possível de fonte de potássio para as plantas. É uma rocha de origem vulcânica que pode conter de 7 a 14% K<sub>2</sub>O e o mineral predominante, na sua composição mineralógica, é o feldspato potássico. Além disso, apresenta elevado teor de óxidos alcalinos, o que enquadra o fonolito como um fundente muito utilizado pelas indústrias cerâmicas (Andrade et al., 2005). O potássio presente nos feldspatos potássicos está preso na estrutura cristalina, tornando o

fonolito uma fonte insolúvel em ácidos fracos. Portanto, essa fonte de potássio possui potencial para uso como fertilizantes de liberação lenta, principalmente para a aplicação em culturas que demandem o potássio em longo prazo (Luz et. al., 2010). O produto comercial tem nome de Ekosil, é extraído em Poço de Caldas, MG, pelo processo de moagem, sem adição de processos químicos para a sua produção. É composto por fonolito e apresenta granulometria de 0,075mm, K<sub>2</sub>O total de 8%; 25% de Si; 1,0% de Ca; 0,01% de Zn; 0,15% de Mg; 0,0004% de Co e 0,15% de Mn.

Ocorreram ações hidrotermais durante um longo período em quase todo o planalto de Poço de Caldas, após a intrusão alcalina. Nas áreas onde esta ação foi mais intensa, houve profundas modificações das rochas que sofreram remineralizações mais ou menos intensas, além de uma completa alteração dos seus minerais constituintes com o carreamento muitas vezes quase que total de alguns de seus componentes químicos e consequente enriquecimento em relação a outros (CORTES et al., 2010). Daí surge o fonolito hidrotermalizado. O produto comercial, de nome Potasil, é constituído por fonolito hidrotermalizado e extraído também em Poço de Caldas, MG. Possui granulometria de 0,075mm, K<sub>2</sub>O total de 12%; Si total de 25%; 0,1% de Ca; 0,1% de Mg; 0,01% de Zn; 0,001% de Co e 0,15% de Mn.

O terceiro produto comercial é o Kforte, que apresenta K<sub>2</sub>O total de 10%, silício 25%, magnésio 0,5% e manganês 0,08%. A rocha utilizada para a sua produção é o siltito glauconítico, rocha sedimentar de cor verde, abundante na região de São Gotardo, Minas Gerais. Possui mineralogia composta por quartzo, albita, feldspato potássico, glauconita, clorita, mica branca, magnetita, caulinita e opacos (PIZA et al., 2009), podendo conter hornblenda, magnetita, augita, zircão, epidoto, turmalina, granada e outros minerais detriticos (TEDROW, 2002). De acordo com Piza et al. (2009), a coloração verde da rocha é dada pela presença de Fe. Essa rocha é encontrada predominantemente na região do Alto-Paranaíba (Minas Gerais). Geologicamente, as jazidas encontram-se no Cráton do São Francisco, no Grupo Bambuí, na Formação Serra da Saudade (Figura 1). A formação é constituída por folhelhos intercalados com siltito glauconítico, em alternância centimétrica a métrica, com alguns níveis de fosforita no topo (PIZA et al., 2009). Os minerais potássicos presentes no siltito glauconítico apresentam baixa solubilidade em água, o que torna necessário o beneficiamento da rocha para a liberação do potássio. Os ensaios de liberação de K<sub>2</sub>O em solução ácida dessa rocha mostraram que somente uma parcela desse nutriente encontra-se na forma solúvel (SILVA et al., 2012).

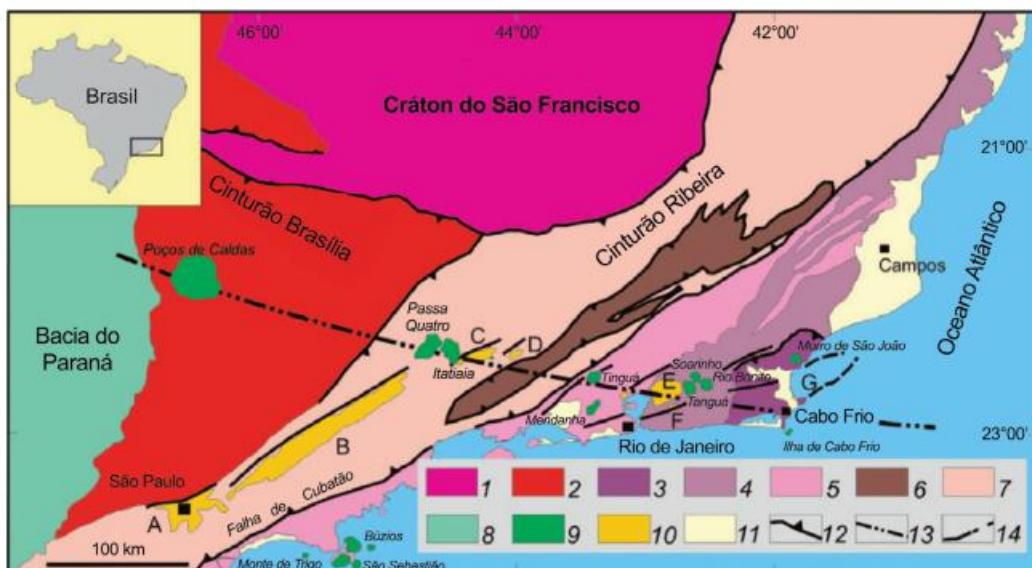
Estas rochas têm sido alvo de diversos estudos e experimentos, estão registradas como remineralizadores no MAPA e são permitidas para uso na agricultura orgânica, por serem rochas que passaram apenas pelo processo de moagem, sem a adição ou utilização de produtos químicos. Na Tabela 2, estão reunidas as informações dos três remineralizadores utilizados

**Tabela 2.** Composição dos remineralizadores: fonolito, fonolito hidrotermalizado e siltito glauconítico. Fonte: Rótulo dos produtos.

Nome comercial	Rocha	Granulometria	K <sub>2</sub> O total	Si	K <sub>2</sub> O Solúvel*	Ca	Zn	Mg	Co	Mn	Origem
mm										----- % -----	
Ekosil	Fonolito	0,075	8	25	1%	1	0,01	0,15	0,0004	0,15	Ígnea
Potasil	Fonolito hidrotermalizado	0,075	12	25	---	0,1	0,01	0,1	0,001	0,15	Ígnea
Kforte	Siltito glauconítico	----	10	25	---	---	---	0,5	----	0,08	Sedimentar

\*Solúvel em ácido cítrico 2%

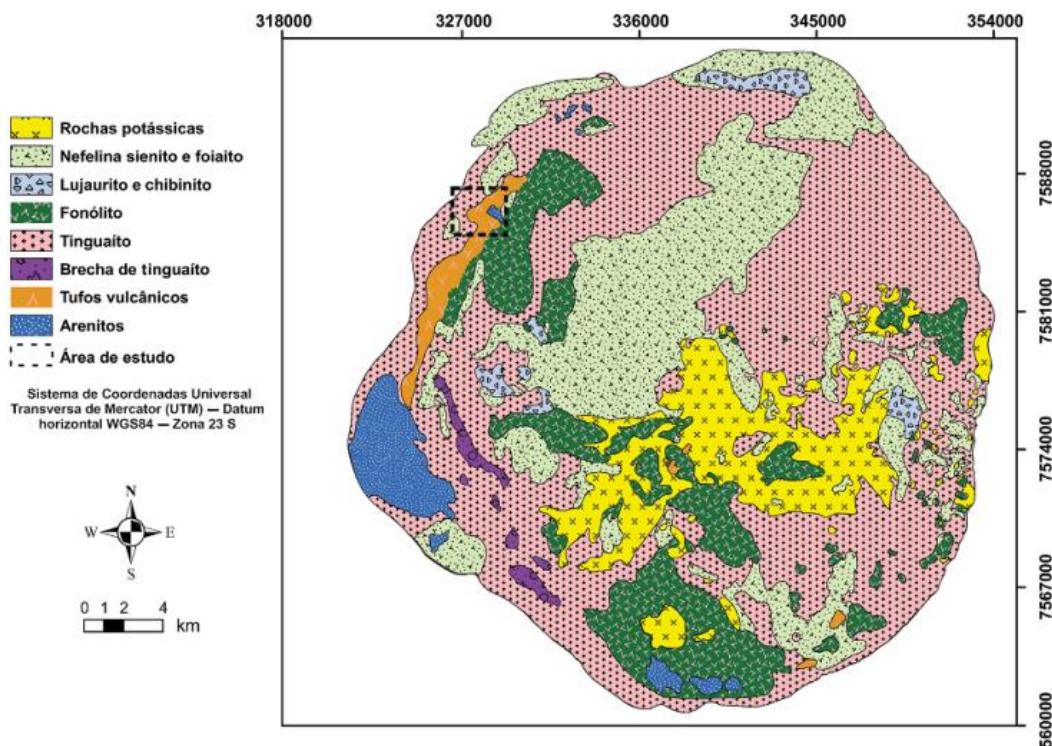
**Figura 1:** Mapa tectônico da região Sudeste do Brasil. Fonte BACHA et al. (2020)



Fonte: Almeida e Carneiro (2012).

**Figura 1.** Mapa tectônico da região Sudeste do Brasil: (1) Cráton do São Francisco; (2) Cinturão Brasília; (3) Terreno Cabo Frio; (4) Terreno Oriental – Domínio Costeiro; (5) Terreno Oriental – Arco Magnético Rio Negro; (6) Klippe Paraíba do Sul; (7) Terreno Ocidental; (8) Bacia do Paraná; (9) corpos alcalinos do Cretáceo Superior a Eoceno; (10) Bacias do Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB); A – São Paulo; B – Taubaté; C – Resende; D – Volta Redonda; E – Macacu; F – Itaboraí; G – Barra de São João; (11) sedimentos cenozoicos indiferenciados; (12) falhas reversas, nappes; (13) Alinhamento Magnético de Cabo Frio; (14) limites de grâbens do RCSB.

**Figura 2:** Composição geológica do planalto de Poço de Caldas, MG. Fonte BACHA et al. (2020)



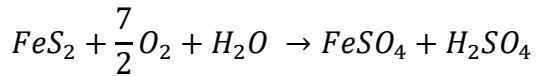
Fonte: modificado de Ellert (1959), Ulbrich et al. (2002) e Indústrias Nucleares do Brasil (INB, 2011).

## 2.2. Intemperismo

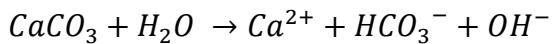
O intemperismo é caracterizado pelas transformações que ocorrem nos minerais das rochas e que os degradam e fragmentam. O intemperismo pode ser físico, químico, biológico ou a combinação de dois ou mais fatores (TOLEDO, 2014). Ocorre quando da exposição das rochas aos agentes intempéricos da atmosfera (radiação solar, água, oxigênio, ventos, organismos).

O intemperismo físico ocorre principalmente pelas variações de temperatura e pressão e resulta na fragmentação das rochas. É um processo exclusivamente mecânico, que se dá pela ação térmica da radiação solar: variação de temperatura causa a esfoliação das rochas; pela ação mecânica da água: chuvas, mares, rios, gelo, erosão (arraste superficial das partículas), lixiviação (remoção de substâncias solúveis para camadas profundas do solo); ação mecânica dos ventos; e a ação mecânica dos seres vivos: penetração de raízes em fendas de rochas, galerias cavadas por insetos e anelídeos (TOLEDO, 2014).

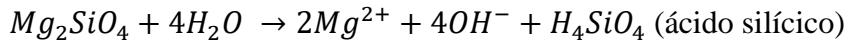
O intemperismo químico é caracterizado pela ação química que a água e o ar têm com a superfície da rocha. As alterações químicas podem ser do tipo oxidação e redução, tendo como exemplo a oxidação da pirita:



Na dissolução, ocorre solubilização completa do mineral e os íons solúveis podem ser lixiviados, tendo como exemplo a dissolução da calcita:

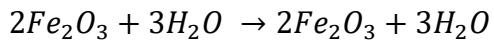


Na hidrólise, os silicatos sofrem hidrólise em contato com a água, com formação de produtos secundários, sendo exemplo a hidrólise da fosterita:

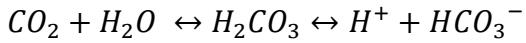


Estas reações são aceleradas com a lixiviação dos produtos solúveis (BLOOM; NATER, 1991).

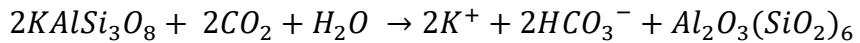
Na hidratação, há incorporação de água na estrutura cristalina, tendo como exemplo a hidratação da hematita:



Na carbonatação, ocorre a formação de ácido carbônico pela dissolução do CO<sub>2</sub> na água:



(Ortoclásio)



Esses tipos de acidez aceleram a decomposição dos minerais. A atmosfera possui 0,03% de CO<sub>2</sub> e o ar do solo possui 0,2 a 4% devido à respiração de raízes e microrganismos (BLOOM; NATER, 1991).

Na quelação, ocorre a retenção de um íon metálico (particularmente Fe<sup>3+</sup> e Al<sup>3+</sup>) dentro da estrutura de um composto orgânico, de propriedades quelantes. Estes complexos ficam parcialmente solúveis e podem ser lixiviados ou acumular-se em camadas subsuperficiais do solo.

O intemperismo biológico ocorre pela ação dos organismos. A porção viva do solo é representada principalmente por microrganismos (algas, fungos, bactérias, actinomicetos), macro e mesofauna (roedores, insetos, aracnídeos, moluscos, anelídeos) e macroflora (raízes de plantas). A presença de raízes que causam a fragmentação da rocha (ação mecânica), a respiração das raízes e a dos microrganismos, que aumentam a concentração de CO<sub>2</sub> do ar do solo e que exsudam substâncias, como os ácidos orgânicos, assim como a matéria orgânica depositada sob a sua superfície e a ação dos microrganismos, todos esses elementos contribuem também para a decomposição e fragmentação, aliados muitas vezes ao próprio intemperismo químico e físico.

### **2.3. Potássio (K)**

O potássio é um macronutriente essencial às plantas e é o segundo nutriente essencial mais absorvido pelos vegetais. Tem como função a ativação metabólica da catálise biológica, responsável pela ativação de mais de 60 enzimas, promovendo o metabolismo do nitrogênio e a síntese de proteínas; regulação da osmose; regulação dos estômatos (Hedrich, 2012), síntese do açúcar e acúmulo deste nos tecidos especializados. O potássio não apresenta função estrutural, mas é responsável por vários processos fisiológicos importantes para o desenvolvimento equilibrado, contribuindo, assim, para altas produtividades (ALVES et al, 2021). A deficiência de potássio reduz o tamanho dos internódios, a dominância apical e o crescimento das plantas, retarda frutificação e origina frutos de menor tamanho e com menor intensidade cor. Como o potássio é um nutriente móvel pelo floema, os sintomas de deficiência são normalmente caracterizados por clorose nas bordas das folhas, seguida de necrose, surgindo primeiro nas folhas mais velhas das plantas (NOVAIS, 2007).

A absorção do potássio pelas plantas vai depender de diversos fatores, uma vez que este pode estar presente no solo e não estar disponível para as plantas. De acordo com Zörb et al. (2014), de acordo com a sua disponibilidade para as plantas, este macronutriente pode ser

classificado em: potássio solúvel em água, presente na solução do solo, que está prontamente disponível para as plantas e, por isso, sujeito à lixiviação; potássio trocável, adsorvido na superfície dos argilominerais e de coloides orgânicos do solo; potássio não trocável, que é o mais fortemente retido por ligações de alta energia nos sítios de troca, entre as camadas dos argilominerais ou em minerais primários; e potássio estrutural, que é aquele que é incorporado às estruturas cristalinas de minerais, como os feldspatos e as micas. A maior parte do potássio do solo (98%) encontra-se na estrutura dos minerais primários e secundários, sob a forma de potássio estrutural, e só uma pequena fração se encontra em formas mais prontamente disponíveis para as plantas (NOVAIS 2007). Deficiência de potássio é frequente principalmente em sistema intensivos de produção. Segundo Lopes (1982), os teores de potássio, nos solos do Brasil, variam de 0,05% a 2,5%, sendo os maiores valores em solos menos intemperizados.

Os solos brasileiros, em geral, apresentam teores reduzidos de potássio e existe uma carência de extração desse minério no território nacional. O Brasil é o segundo maior consumidor e o principal importador mundial. Devido à falta da produção interna, as importações são de 96% dos fertilizantes potássicos consumidos pela agricultura (MAPA 2022).

#### **2.4. Biossolubilização**

Como o potássio presente nos remineralizadores está sob a forma estrutural e é de lenta e difícil disponibilização, existe a possibilidade de aumentar a liberação de potássio das rochas com a biossolubilização. Estudos têm mostrado que diversos grupos de microrganismos, como bactérias e fungos, têm a capacidade de solubilizar o potássio retido em minerais silicáticos, por meio de sua decomposição (Sattar et al., 2019).

Dentro dos microrganismos estudados, os resultados foram mais eficientes na disponibilização de potássio com a bactéria *Burkholderia* sp. Além disso, observou-se correlação entre a diminuição do pH e o aumento da solubilização de potássio. Além do potássio, as rochas têm na sua composição outros nutrientes benéficos para o crescimento e desenvolvimento vegetal, assim como o seu efeito alcalinizante que atua como condicionador do solo (RESENDE et al., 2005).

A relação que se tem mostrado mais provável para a biossolubilização de minerais de rocha é a redução do pH no meio devido à produção de ácidos orgânicos (LIAN et al., 2008; BIN et al., 2010; MEENA et al., 2014). Os ácidos orgânicos oxálico, tartárico, glucônico,

cítrico, málico e succínico são os mais liberados durante a solubilização de potássio (SHENG e HE, 2006; PRAJAPATI et al., 2012).

## 2.5. Ácidos Orgânicos

A produção de ácidos orgânicos e a consequente redução de pH são os mais importantes fatores de solubilização (VASSILEV et al., 2006).

Os ácidos orgânicos presentes na matéria orgânica, exsudados por microrganismos e plantas, podem aumentar a liberação de potássio presente em minerais para o solo atuando com a formação de complexos organometálicos ou a liberação de H<sup>+</sup> (MACHADO, 2016).

Os ácidos orgânicos são caracterizados por possuírem um ou mais grupos carboxílicos de baixo peso molecular, e são encontrados em todos os organismos (SILVA, 2017). Em meio aquoso, devido à presença do grupo funcional carboxila (COOH), são classificados como ácidos fracos e apresentam facilidade de formar interações intermoleculares. Possibilitam também a complexação de cátions metálicos em solução e o deslocamento de ânions da matriz do solo (JONES, 1998), sendo relacionados a múltiplos processos no solo.

Os ácidos orgânicos estão intimamente ligados a processos operados na rizosfera. As raízes são responsáveis pela liberação de compostos orgânicos e inorgânicos, causando diferentes reações químicas e modificando a população microbiana, assim como a disponibilidade de nutrientes (FAGERIA et al, 2009). Assim como as raízes, os microrganismos que atuam na decomposição de matéria orgânica mineralizam ou solubilizam compostos que também produzem estes ácidos que são liberados no solo.

O ácido cítrico acelera a decomposição de minerais devido aos seus três grupos de carboxila (COOH), que podem dissociar e, com isso, liberar prótons e promover mudanças químicas nos minerais, com consequente liberação de nutrientes (SILVA, 2017).

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos com o uso de ácidos para a solubilização de determinados nutrientes. Inclusive, como demonstrado por Lemos (2011), a aplicação de ácido cítrico na dose de 1,3 kg.ha<sup>-1</sup> possibilitou um aumento na produtividade da cultura do café. Segundo os autores, isso ocorreu como consequência de uma maior disponibilização de K e P e, ao mesmo tempo, não influenciou o pH do solo e os teores de carbono orgânico. Isto indica que o ácido cítrico é promissor no uso com remineralizadores que apresentam baixa disponibilidade de nutrientes. O ácido cítrico monoidratado CAS 5949-29-1 está registrado na portaria nº52 do MAPA, de 2021, que estabelece o Regulamento Técnico para os Sistemas

Orgânicos de Produção e as listas de substâncias e práticas para o uso nos Sistemas Orgânicos de Produção, sendo permitida a sua utilização.

## 2.6. Agricultura Orgânica

Os sistemas de produção orgânico e agroecológico são regulamentados pela Lei nº 10.831 de dezembro de 2003. Segundo esta Lei, considera-se sistema orgânico de produção agropecuária todo aquele em que se adotam técnicas específicas mediante a otimização do uso dos recursos naturais e socioeconômicos disponíveis e o respeito à integridade cultural das comunidades rurais, tendo por objetivo a sustentabilidade econômica e ecológica, a maximização dos benefícios sociais, a redução ao mínimo da dependência das energias não renováveis, optando sempre que possível por métodos culturais, biológicos e mecânicos, em contraposição ao uso de materiais sintéticos, sem o uso de organismos geneticamente modificados e radiações ionizantes, em qualquer fase do processo de produção, processamento, armazenamento, distribuição e comercialização, e a proteção do ambiente.

A finalidade de um sistema de produção orgânico é: a oferta de produtos saudáveis isentos de contaminantes intencionais; a preservação da diversidade biológica dos ecossistemas naturais e a recomposição ou incremento da diversidade biológica dos ecossistemas modificados em que se insere o sistema de produção; incrementar a atividade biológica do solo; promover o uso saudável do solo, da água e do ar, reduzir ao mínimo todas as formas de contaminação desses elementos que possam resultar das práticas agrícolas; manter ou incrementar a fertilidade do solo a longo prazo; a reciclagem de resíduos de origem orgânica, reduzindo ao mínimo o emprego de recursos não renováveis; basear-se em recursos renováveis e em sistemas agrícolas organizados localmente; incentivar a integração entre os diferentes segmentos da cadeia produtiva e de consumo de produtos orgânicos e a regionalização da produção e comércio desses produtos; manipular os produtos agrícolas com base no uso de métodos de elaboração cuidadosos, com o propósito de manter a integridade orgânica e as qualidades vitais do produto em todas as etapas. O conceito de sistema orgânico de produção agropecuária e industrial abrange os denominados: ecológico, biodinâmico, natural, regenerativo, biológico, agroecológicos, permacultura e outros que atendam os princípios estabelecidos por esta Lei. Considera-se produto da agricultura orgânica ou produto orgânico, seja ele *in natura* ou processado, aquele obtido em sistema orgânico de produção agropecuário

ou oriundo de processo extrativista sustentável e não prejudicial ao ecossistema local (BRASIL, 2003).

A agricultura orgânica preconiza, dentro de outros preceitos, as práticas conservacionistas de preparo de solo, rotação de culturas, consórcios de culturas, uso de adubação verde, controle biológico de pragas e doenças, a utilização com responsabilidade e consciência dos recursos naturais, a priorização dos insumos internos e reciclagem de resíduos orgânicos com a intenção de criar redes locais e diminuir a dependência por insumos externos e recursos não-renováveis, utilização da diversidade de espécies no cultivo e suas funções no sistema, a utilizar a cobertura do solo, adição de matéria orgânica, rotação de culturas, integração lavoura-pecuária e, para a fertilização das culturas, o uso de adubação orgânica (ALMEIDA, 2003).

Segundo Souza e Alcântara (2008), os adubos orgânicos podem ser divididos em simples, mistos, compostos e organominerais. A adubação orgânica ainda é um dos principais desafios da agricultura orgânica para esta poder evoluir e atingir escalas de maior proporção. Dentro da proposta orgânica e agroecológica, os adubos sintéticos e os altamente solúveis não são permitidos. Dessa forma, a principal fonte potássica utilizada na agricultura orgânica é o sulfato de potássio. De acordo com a Instrução Normativa MAPA nº46/2011, o sulfato de potássio é permitido para uso na agricultura orgânica, desde que atenda a determinadas condições. A normativa especifica que o sulfato de potássio deverá ser de origem natural e seu processamento não deve alterar suas propriedades naturais, incluindo a proibição de tratamentos químicos que modifiquem sua estrutura molecular ou que adicionem substâncias não permitidas pela agricultura orgânica.

Assim como os demais fertilizantes potássicos, o sulfato também é importado (95% importado contra 5% de produção nacional). Assim, buscam-se alternativas às fontes potássicas no que tange aos aspectos econômicos e ambientais. O estudo dos remineralizadores se dá nesse contexto. Provenientes da indústria de mineração como um rejeito, apresentam lenta solubilização de nutrientes e as doses, a eficiência e os fatores que aceleram a sua solubilização para as plantas ainda necessitam de pesquisa.

## 2.7. Cultura do Milho

O milho (*Zea mays L.*), é uma planta pertencente à família *Poaceae/Gramineae*. É uma das culturas mais importantes e versáteis do mundo, cultivada para produção de alimentos,

rações, bioenergia e produtos industriais. Os aspectos vegetativos e reprodutivos da planta de milho podem ser diferentes pela diversidade de variedades e interações ambientais. No geral, o resultado da seleção e domesticação foi uma planta anual que pode crescer até quatro metros de altura, robusta e ereta, com uma haste principal e folhas longas. O milho é uma planta C4, o que significa que possui uma via fotossintética eficiente, permitindo-lhe prosperar em climas quentes e ensolarados. As espigas de milho contêm grãos ricos em amido, vitaminas e minerais, sendo uma das principais fontes de carboidratos na dieta humana e animal (MAGALHÃES, 2002).

O milho é originário das Américas, com evidências arqueológicas sugerindo que foi domesticado há cerca de 9.000 anos na região do México. Foi uma cultura central para civilizações antigas, como os maias, astecas e incas, desempenhando um papel crucial na sua alimentação e cultura. Com a chegada dos europeus às Américas, o milho foi introduzido na Europa e, posteriormente, espalhado para outras partes do mundo, tornando-se uma das principais culturas agrícolas globais (ALCANTARA, 2019).

O milho é uma das culturas mais cultivadas no mundo, atingindo uma produção anual de mais de 1 bilhão de toneladas. Os principais produtores globais incluem Estados Unidos, China, Brasil, Argentina e Índia. Os Estados Unidos lideram com uma produção que frequentemente excede 350 milhões de toneladas por ano, grande parte destinada à alimentação animal e produção de etanol (Secretaria da Agricultura e Abastecimento, 2022).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, atrás dos Estados Unidos e da China, tendo produzido, na safra 2022/23, cerca de 131 milhões de toneladas do cereal (Tabela 3). O cultivo nacional é concentrado nas regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste, com destaque para os estados de Mato Grosso, Paraná, Goiás e Minas Gerais.

O milho é essencial para a economia agrícola brasileira, sendo utilizado tanto para consumo interno quanto para exportação. As diferenças existentes nos rendimentos agrícolas são devido a fatores edafoclimáticos e econômicos e ao estoque de conhecimento disponível e disseminado entre os agricultores.

A produção nacional de milho é dividida em duas épocas de plantio: os plantios de verão (primeira safra), realizados no período chuvoso, que varia desde os fins de agosto, na região Sul, até os meses de outubro/novembro no Sudeste e Centro-Oeste, e o plantio no Nordeste, que ocorre no início do ano. A safrinha ou segunda safra se refere ao milho sequeiro, plantado em fevereiro ou março, quase sempre depois da soja precoce, predominantemente, na região Centro-Oeste e nos estados do Paraná e São Paulo (CRUZ et al., 2008).

**Tabela 3.** Distribuição da área plantada, produtividade e produção de milho no Brasil. Fonte: Conab 2024

Região	Área (mil ha)		Produtividade (kg/ha)		Produção (mil t)	
	22/23	23/24	22/23	23/24	22/23	23/24
Safra						
<b>Norte</b>	1.229,9	1.279,5	4.332	4.497	5.327,3	5.754,3
<b>Nordeste</b>	3.300,7	2.953,8	3.542	3.141	11.691,5	9.277,5
<b>Centro-Oeste</b>	11.650,5	10.890,7	6.641	6.253	77.369,5	68.097,9
<b>Sudeste</b>	2.088,8	1.916,7	6.088	5.131	12.716,1	9.834,5
<b>Sul</b>	3.999,3	3.923,8	6.198	5.781	24.788,2	22.684,4
<b>Brasil</b>	22.269,2	20.964,5	5.923	5.516	131.892,6	115.648,6

No Brasil, existem dois tipos de produções principais de milho, o milho grão e o milho verde. A produção de milho grão é a mais significativa, com a maior parte da produção destinada à alimentação animal, indústria de alimentos e produção de bioenergia. O milho grão é geralmente colhido quando os grãos estão completamente secos e maduros. O milho verde, que é colhido enquanto ainda está na fase leitosa, é utilizado principalmente para consumo humano, especialmente na forma de espigas cozidas ou assadas. A produção de milho verde é muito menor em comparação com o milho grão, sendo mais comum em pequenas propriedades e agricultores familiares, voltada para o mercado interno, especialmente para consumo direto. O milho verde pode ser considerado uma hortaliça, devido ao seu ciclo mais curto (ao redor de 90 dias no verão e 120 no inverno) e na sua forma de entrega, pois o produto tem tempo de prateleira reduzido, dependendo das condições climáticas e transporte. Assim, a sua produção deve se situar o mais próximo dos consumidores, o que feito, muitas vezes, por venda direta ou em feiras. A cultura de milho verde é de grande importância para o pequeno e médio produtor e agricultor familiar e apresenta um grande valor econômico devido à demanda pelo produto in natura e pela indústria de conservas alimentícias, assim como outros benefícios, como mão de obra familiar, movimentação do comércio, transporte e indústria caseira (PEREIRA FILHO et al., 2002).

Em termos de produtividades Paiva Junior et al., (2001) com a semente AG1061 apresentou resultados de 16.730 kg de espigas ha<sup>-1</sup>, diâmetro médio da espiga 3,91cm e comprimento médio da espiga de 20,50 cm. Pereira Filho et al. (1998), em produção destinada ao consumo verde com sementes AG1051, obtiveram 10.796 kg de espigas ha<sup>-1</sup>, comprimento médio de 18 cm e diâmetro médio de 5 cm. Massad et al. (2017) obtiveram diâmetro médio da espiga de 2,83 cm, comprimento médio de 11,54 cm e produtividade de 65.000 espigas ha<sup>-1</sup>.

Em relação às exigências nutricionais, dados médios de experimentos conduzidos na Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG, apontaram para as demandas nutricionais do milho (Tabela 4). Foi observado que a extração de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio aumentou linearmente com o aumento da produtividade. A maior exigência do milho foi referente a nitrogênio e potássio, seguindo-se de cálcio, magnésio e fosforo (CRUZ et al., 2008).

**Tabela 4.** Extração média de nutrientes pela cultura do milho. Fonte: Cruz et al. (2008)

Tipo de exploração	Produtividade (t.ha <sup>-1</sup> )	Nutrientes extraídos (kg.ha <sup>-1</sup> )				
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO
Grãos	3,65	77	20,61	99,6	13,9	16,6
	5,80	100	43,51	114	23,63	28,22
	7,87	167	75,57	135,6	37,53	41,5
	9,17	187	77,86	171,6	41,7	46,48
Silagem	10,15	217	96,18	188,4	44,48	54,78
(Matéria seca)	15,31	181	48,09	255,6	56,99	46,48
	18,65	231	59,54	310,8	80,62	53,12

Os nutrientes têm diferentes taxas de translocação entre os tecidos (colmos, folhas e grãos). No que se refere à exportação, o fósforo é quase todo translocado para os grãos, com 77 a 86%, sendo seguido por nitrogênio com 70 a 77%, enxofre com 60%, magnésio com 47 a 69%, potássio com 26 a 43% e cálcio com 3 a 7%. As porcentagens restantes permanecem na palhada do milho (CRUZ et al 2008).

### **3.CAPÍTULO I**

## **EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE REMINERALIZADORES NO CULTIVO DE MILHO VERDE SOB O MANEJO ORGÂNICO**

### **3.1. RESUMO**

Os remineralizadores foram inseridos no Plano Nacional de Fertilizantes por serem considerados uma possível alternativa aos fertilizantes potássicos utilizados e de produção nacional. Apresentam solubilização lenta, o que pode ser uma vantagem para os solos de clima tropical. Mas, ao mesmo tempo, podem não disponibilizar nutrientes suficientes para o desenvolvimento das culturas. Considerando que existe uma grande diversidade de remineralizadores, acredita-se que a utilização de remineralizadores com alto teor de K<sub>2</sub>O (acima de 8%) apresente eficiência agronômica quanto ao fornecimento de potássio para a cultura do milho. Diante disso, objetivou-se determinar a eficiência agronômica de remineralizadores no cultivo de milho em um sistema de cultivo orgânico e em vasos. Foram realizados dois experimentos, o primeiro foi instalado na área experimental da Embrapa Agrobiologia, sediada no município de Seropédica, RJ. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com 20 tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos consistiram de diferentes doses de três tipos de remineralizadores (fonolito hidrotermalizado com K<sub>2</sub>O total de 12%; fonolito com K<sub>2</sub>O total de 8% e siltito glauconítico com K<sub>2</sub>O total de 10%) e, também, de diferentes doses de sulfato de potássio (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). As doses são de 50%, 100%, 150%, 300% e 1500% da dose recomendada segundo o manual de adubação para a cultura do milho, de 40kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>. Concluiu-se que o fonolito e o fonolito hidrotermalizado, usando juntamente com o sulfato de potássio, apresentaram resultados de eficiência agronomia de fornecimento de potássio de 43% e 30%, respectivamente, assim como em relação à produtividade do milho no tratamento de fonolito (40 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>) + K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (20 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>), com produtividade de grão de 3.486,67 kg.ha<sup>-1</sup> e, no tratamento fonolito hidro, (40 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>) + K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (20 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>) com produtividade de grão de 3.565,00 kg.ha<sup>-1</sup>, equivalente à produtividade com a dose padrão de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (40 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>) de 3.395,00 kg.ha<sup>-1</sup>. O resultado sugere que os remineralizadores têm potencial de substituição de 50% das fontes convencionais de K. A adubação dos

remineralizadores isoladamente não apresentou incremento na produtividade do milho, em relação ao controle, e não apresentou eficiência agronômica, quando os remineralizadores foram utilizados como total substituição da adubação potássica. O segundo experimento foi instalado na casa de vegetação da Embrapa Agrobiologia, sediada no município de Seropédica, RJ. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados em esquema fatorial 2x8+1, com 17 tratamentos e três repetições, totalizando 51 unidades experimentais, tendo sido utilizados vasos com capacidade 7 dm<sup>3</sup> (6kg de solo). Os tratamentos consistiram de diferentes doses de dois tipos de remineralizadores (fonolito hidrotermalizado com K<sub>2</sub>O total de 12% e fonolito com K<sub>2</sub>O total de 8%), correspondendo ao primeiro fator e ao segundo fator as oito doses de remineralizadores utilizados (0,5%; 1%; 5%; 10%; 25%; 50%; 75% e 100%). Assim, o 0% correspondeu à utilização de solo sem remineralizador e o 100% correspondeu à utilização de remineralizador como substrato (sem solo). Concluiu-se que a adubação potássica com fonolito incrementou em 40% a produtividade de massa seca do milho em vasos e o fonolito hidrotermalizado em 65% da produtividade, comparado com o controle sem uso de adubação potássica. O fonolito se mostrou mais eficiente, pois com menores quantidades conseguiu chegar a melhores produtividades e acúmulo de K na matéria seca. No entanto, o seu uso em doses muito altas pode ser prejudicial. O fonolito hidrotermalizado não apresentou danos para as produtividades com o aumento de sua dosagem, podendo até ser usado como um substrato para o desenvolvimento das plantas.

**Palavras-chave:** Remineralizadores; Fonolito; Fonolito hidrotermalizado; Siltito glauconítico; Milho

### **3.2. ABSTRACT**

Remineralizers were included in the National Fertilizer Plan because they are considered a possible alternative to the potassium fertilizers currently used and produced domestically. They exhibit slow solubilization, which can be advantageous for tropical soils, but at the same time may not provide sufficient nutrients for crop development. Considering the great diversity of remineralizers, it is believed that the use of remineralizers with high K<sub>2</sub>O content (above 8%) will demonstrate agronomic efficiency in supplying potassium for corn cultivation. The objective was to determine the agronomic efficiency of remineralizers in organic corn cultivation in pots. Two experiments were conducted; the first was set up at the experimental

area of Embrapa Agrobiology, located in Seropédica-RJ. The experimental design was a randomized block design, with 20 treatments and 4 replications. The treatments consisted of different doses of 3 types of remineralizers (hydrothermally phonolite with a total K<sub>2</sub>O of 12%; phonolite with a total K<sub>2</sub>O of 8%; and glauconitic siltstone with a total K<sub>2</sub>O of 10%). Additionally, different doses of potassium sulfate (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) were used. The doses were 50%, 100%, 150%, 300%, and 1500% of the recommended dose according to the fertilization manual for corn cultivation, which is 40 kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>. It was concluded that phonolite and hydrothermally phonolite, when used together with potassium sulfate, showed agronomic efficiency results for potassium supply of 43% and 30%, respectively. In terms of corn productivity, the treatment of phonolite (40 kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>) + K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (20 kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>) yielded a grain productivity of 3,486.67 kg.ha<sup>-1</sup>, while the hydrothermally phonolite treatment (40 kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>) + K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (20 kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>) yielded 3,565.00 kg.ha<sup>-1</sup>, comparable to the standard potassium sulfate dose (40 kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>) with a productivity of 3,395.00 kg.ha<sup>-1</sup>. This suggests that remineralizers have the potential to replace 50% of conventional K sources. The application of remineralizers alone did not result in increased corn productivity compared to the control and showed no agronomic efficiency when used as a complete replacement for potassium fertilization. The second experiment was conducted in the greenhouse of Embrapa Agrobiology, also in Seropédica-RJ. The experimental design was a randomized block design in a 2x8+1 factorial scheme, with 17 treatments and 3 replications, totaling 51 experimental units, using pots with a capacity of 7 dm<sup>3</sup> (6 kg of soil). The treatments consisted of different doses of 2 types of remineralizers (hydrothermally phonolite with a total K<sub>2</sub>O of 12% and phonolite with a total K<sub>2</sub>O of 8%), corresponding to the first factor, and the second factor included 8 doses of remineralizers used (0.5%; 1%; 5%; 10%; 25%; 50%; 75%; and 100%). Thus, 0% corresponds to the use of soil without remineralizer and 100% corresponds to the use of remineralizer as substrate (without soil). It was concluded that potassium fertilization with phonolite increased dry mass productivity of corn in pots by 40%, while hydrothermally phonolite increased productivity by 65% compared to the control without potassium fertilization. Phonolite proved to be more efficient, as it achieved better productivity and potassium accumulation in dry matter with lower quantities; however, its use in very high doses could be detrimental. In contrast, hydrothermally phonolite did not show any negative effects on productivity with increasing doses and could even serve as a substrate for plant development.

**Keywords:** Remineralizers; Phonolite; Hydrothermally Phonolite; Glauconitic Siltstone; Maize

### **3.3. INTRODUÇÃO**

Os remineralizadores foram inseridos no Plano Nacional de Fertilizantes por serem considerados uma possível alternativa aos fertilizantes potássicos utilizados e de produção nacional. Estes podem então ser inseridos nas práticas agrícolas e diminuir a dependência externa por fertilizantes potássicos, assim como também diminuir os custos de produção. Os remineralizadores são parte de uma categoria específica de insumo agrícola estabelecida pela legislação dos fertilizantes. A sua definição, de acordo com a Lei nº 12.890/2013 (Brasil, 2013), é que se trata de todo material que tenha sofrido apenas processos de redução de tamanho de partículas e que altere os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promova a melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas ou da atividade biológica do solo. No entanto, por serem materiais de solubilização lenta e gradual, ainda não é comprovada a sua eficiência agronômica. Por outro lado, Leonardos et al. (2000) destacam que a baixa solubilização é um aspecto positivo do uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes, em agricultura tropical, onde a interação de fatores do solo (baixa CTC) e do clima (alta pluviosidade) tornam os nutrientes provenientes dos fertilizantes solúveis mais suscetíveis à lixiviação.

Diferentes autores, como Souza et al. (2017), Zhao et al. (2019) e Torqueti et al. (2016), relatam que, em suas pesquisas, os remineralizadores utilizados apresentaram incrementos semelhantes aos proporcionados pelo KCl. Mas, contrariamente, diversos autores, como Santos et al. (2016), Ciceri et al. (2019), Boldrin et al. (2019), Boldrin et al. (2020) e Tavares et al. (2018), relatam que a adubação potássica com remineralizadores isoladamente não foi eficiente para o suprimento nutricional de diferentes culturas, gerando dúvidas quanto à eficiência do material, motivo para a realização de novas pesquisas, visando obter maior entendimento do seu efeito fertilizante.

Partindo dessa premissa, acredita-se que a utilização de remineralizadores no sistema de cultivo de milho apresenta eficiência agronômica quanto ao fornecimento de potássio.

Diante disso, objetivou-se determinar a eficiência agronômica de remineralizadores no cultivo de milho em um sistema de cultivo orgânico e em vasos. Foram, então, realizados dois

estudos, sendo um em condições de campo e outro em condições de casa de vegetação, que serão apresentados de forma separada neste trabalho.

## A) EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE REMINERALIZADORES NO CULTIVO DE MILHO VERDE SOB O MANEJO ORGANICO EM CONDIÇÕES DE CAMPO

### 3.4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento de campo foi instalado na área experimental da Embrapa Agrobiologia, sediada no município de Seropédica, RJ, com 33 metros de altitude, nas coordenadas latitude - 22,7531 e longitude -43,7159, com um clima do tipo Aw, segundo a classificação de Koppen Geiger. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com 20 tratamentos e quatro repetições, totalizando 80 unidades experimentais com 17,5m<sup>2</sup> (5 x 3,5m). Os tratamentos consistiram de diferentes doses de três tipos de remineralizadores (fonolito hidrotermalizado com K<sub>2</sub>O total de 12%; fonolito com K<sub>2</sub>O total de 8% e siltito glauconítico com K<sub>2</sub>O total de 10%). Também consistiram de diferentes doses de sulfato de potássio (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). As doses são de 50%, 100%, 150%, 300% e 1500% da dose recomendada segundo o manual de adubação (FREIRE et al., 2013) para a cultura do milho, estabelecida a partir da análise de solo.

O solo da área experimental utilizada é um planossolo de textura arenosa. A área foi utilizada para experimentos anteriores, na qual foi realizada a correção do solo com calcário. A análise do solo nas diferentes glebas e camadas encontra-se na Tabela 5. As análises das amostras de terra foram realizadas em setembro de 2022, no laboratório da Embrapa Agrobiologia, utilizando-se os procedimentos baseados no “Manual de Laboratórios: Solo, Água, Nutrição Animal e Alimentos (Nogueira e Souza, 2005). A amostragem da área foi dividida em três glebas representativas e avaliadas nas camadas de 0-20 cm e 20-40cm. Assim, para os resultados do teor de K oscilando entre 0-45 mg dm<sup>-3</sup>, a recomendação é de 40kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>.

**Tabela 5.** Análise química da fertilidade do solo determinada nas amostras de terra da área experimental

	K mg.dm <sup>-3</sup>	Al	Ca cmolc.dm <sup>-3</sup>	Mg -----	H+Al -----	P mg.dm <sup>-3</sup>	pH
Gleba 1 (0-20cm)	20,53	0,0	1,38	0,37	1,12	12,25	6,44

Gleba1 (20-40cm)	9,86	0,0	0,63	0,20	1,35	8,67	6,45
Gleba 2 (0-20cm)	19,17	0,0	1,26	0,42	1,24	14,55	6,25
Gleba 2 (20-40cm)	7,80	0,0	0,44	0,15	1,27	7,53	6,27
Gleba 3 (0-20cm)	22,86	0,0	1,26	0,42	1,44	14,01	6,06
Gleba 3 (20-40cm)	8,76	0,0	0,39	0,12	1,52	9,22	6,04

Os tratamentos estão representados na Tabela 6, com base nas doses de K<sub>2</sub>O recomendadas.

**Tabela 6.** Tratamentos usados no experimento

Tratamentos
1 - Controle
2 – 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
3 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
4 – 60 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
5 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
6 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito
7 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
8 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito
9 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
10 – 600 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito + 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
11 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro.
12 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro. + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
13 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro.
14 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro. + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
15 – 600 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro. + 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
16 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla.
17 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla. + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
18 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla
19 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla. + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

20- 600 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> Siltito gla. + 40 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

---

Com o objetivo de reduzir a disponibilidade de K na área experimental, foi realizada a semeadura de milho sem adubação, com densidade de 60.000 plantas ha<sup>-1</sup>. Após o ciclo de cultivo, a parte aérea foi cortada e removida da área. Posteriormente, a área foi preparada com a utilização da grade aradora, seguindo-se com o implemento sulcador, com o objetivo de marcar as linhas de semeadura do milho. Na semeadura, foi realizada a adubação com termofosfato na dose de 80kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> e, após 11 dias, foi realizada a adubação nitrogenada com 30kg N ha<sup>-1</sup>, utilizando-se torta de mamona (Tabela 7). Aos 43 dias após a semeadura, foi realizado o desbaste do milho e a segunda adubação nitrogenada, na dose de 70kg N ha<sup>-1</sup>, totalizando-se ao final 100kg N ha<sup>-1</sup>.

**Tabela 7.** Teor de nutrientes presentes na torta de mamona

	N	P	K	Mg	Ca	C
			-----g kg <sup>-1</sup> -----			%
Torta de Mamona (TM)	75,07	5,90	13,34	6,16	6,60	40,08

A semeadura do milho foi realizada no dia 2 de fevereiro de 2023. Foram utilizadas as sementes híbridas AG1051 da Seminis em espaçamento de 1,0 metros entrelinhas e 0,2 metros entre plantas, totalizando uma densidade de 50.000 plantas ha<sup>-1</sup>. A irrigação do experimento foi realizada por sistema de aspersão.

A produção de grãos de milho, produção de palha das espigas, produção de sabugos e produção de biomassa seca foram avaliadas aos 100 dias, adotando-se amostragem de 6m<sup>2</sup> por parcela. Para a determinação da biomassa seca, foi retirada uma subamostra, a qual foi levada para a estufa de ventilação forçada, com temperatura de 65°C, até atingir massa constante. Após o processo de secagem, o material foi triturado em moinho de facas tipo Willey. As amostras foram separadas e levadas ao laboratório de Química Agrícola da Embrapa Agrobiologia para determinação do teor de macronutrientes. A análise de N na biomassa foi baseada no método Kjedahl, a de P no método colorimétrico, a de K por fotometria de chama e a de C e Mg pelo método de absorção atômica, de acordo com os procedimentos descritos por Nogueira e Souza (2005).

Determinou-se o teor de nutrientes na folha índice do milho, produção de grãos, produção de espigas, produção de palha das espigas, produção de sabugos, produção de

biomassa seca e acúmulo de nutrientes na biomassa. A folha índice foi coletada do terço basal da folha oposta e abaixo da primeira espiga, o que foi feito após o aparecimento da inflorescência feminina (GOTT et al., 2014).

A análise estatística dos dados foi realizada no programa R 4.2.2 (R Core Team, 2022), tendo sido utilizada a análise de variância e as médias sido comparadas por meio do teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade.

Para o cálculo do índice de eficiência agronômica, foi utilizada a equação de Barnes e Kamprath (1975) adaptada:

$$IEA = \frac{P_i - P_0}{PSFT_i - P_0} \times 100$$

P<sub>i</sub>: Produção nas doses de K

P<sub>0</sub>: Produção na ausência de K

PSFT<sub>i</sub>: A produção no nível de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> considerado, estimada pela curva média de resposta à aplicação de níveis crescentes de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

### 3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 8, é possível observar a produtividade obtida de grãos e de espigas com palha, diâmetro das espigas e fitomassa seca da parte aérea do milho nos diferentes tratamentos. Houve diferença significativa entre os tratamentos, demonstrando que houve efeito e, portanto, resposta à adubação potássica. O suprimento de K na forma de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, em dose igual ou superior a 100% da dose recomendada, resultou em incremento de produtividade de grão de milho em cerca de 12% em relação ao tratamento controle absoluto. Por outro lado, o uso de remineralizadores, independentemente do tipo, não promoveu incremento de produtividade do milho, quando utilizados nas doses de 100% e 300% da dose recomendada. Quando utilizada adubação mista, o fonolito e o fonolito hidrotermalizado se destacaram em relação ao siltito. Onde a aplicação de 100% ou 300% do K na forma deste remineralizador, acrescida de 50% do K na forma K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, promoveu incremento de produtividade, quando comparada ao tratamento que recebeu somente a dose de 50% do K na forma de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e se equiparou à produtividade alcançada com a dose de 100% de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Para siltito glauconítico, a mesma diferença foi observada somente quando a dose foi de 300%, acrescida de 50% de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

O resultado encontrado para fonolito corrobora os resultados obtidos por Soratto et al. (2021), que observaram que o fonolito aumenta a produtividade de grãos do feijão comum e do arroz de terras altas de forma semelhante ao KCl. Além disso, Nogueira et al. (2021), em estudo realizado em casa de vegetação, observaram que o fonolito aumenta de forma linear a biomassa seca da parte aérea do milho em dois solos com teores de K igual a 11 e 27 mg dm<sup>3</sup>. Além disso, outros remineralizadores também têm apresentado resultado positivo. Por exemplo, Borges et al. (2021), ao avaliar a biotita-xisto (3% K<sub>2</sub>O), observaram aumento do rendimento de etanol na batata-doce.

Em relação ao peso da espiga, foi possível observar que o controle apresentou resultados compatíveis com a adubação potássica, e que isso se deve provavelmente e principalmente ao uso da torta de mamona como fonte de nitrogênio, pois esta apresenta potássio também na sua composição. Ou seja, o controle sem adição de potássio apresentou adubação potássica oriunda da torta de mamona. No entanto, o maior peso da espiga não correspondeu ao maior peso de grão.

Quanto ao desempenho agronômico do milho, a produção de grão foi mais baixa em relação à média da Região Sudeste, que é de 5.131 kg.ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2024). No entanto, no presente experimento, o milho foi colhido antes do tempo de maturação do grão, na fase de grão leitoso, sendo esperado uma diminuição da produtividade. Chieza et al. (2017), estudando formas de estabelecer o manejo orgânico do consórcio entre as culturas de milho cultivar híbrido AG 1051 e a crotalária juncea, obtiveram produtividade máxima de grão de 4.443,8 kg.ha<sup>-1</sup> no tratamento de monocultivo do milho manejado com adubação nitrogenada na forma de torta de mamona em condições edafoclimáticas semelhantes. Em relação à produtividade das espigas, foi obtido no experimento resultados próximos das médias nacionais. Segundo Pereira Filho et al. (2002), a média é de 10.796 kg.ha<sup>-1</sup>.

Em relação à produção de palha da espiga e sabugo não ocorreu diferença significativa entre os tratamentos, ficando com uma média de 118 kg.ha<sup>-1</sup> e de 460 kg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

**Tabela 8.** Produtividade de fitomassa seca, espigas com palha, diâmetro da espiga e grãos de milho cultivado em sistema orgânico de produção com uso diferentes doses de remineralizadores e sulfato de potássio.

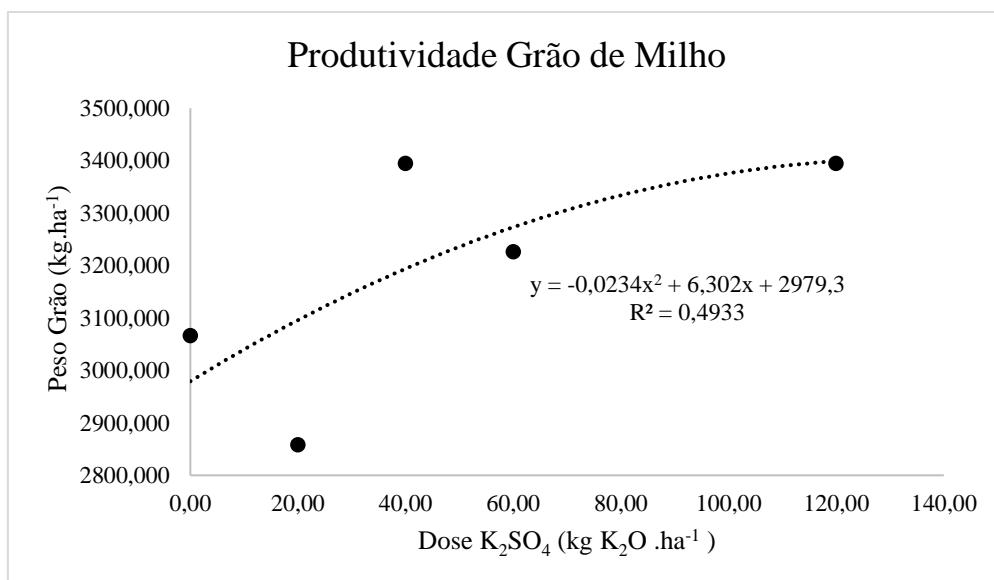
Tratamento	Produtividade do Milho		
	Fitomassa seca <sup>ns</sup>	Espiga com Grãos palha	Diâmetro
			Espiga (mm)

1 - Controle	2.620,37	8.875,00 A	3.066,67 B	46,04 B
2 – 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.458,44	7.500,00 B	2.858,33 B	46,91 A
3 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.410,04	8.500,00 A	3.395,00 A	48,06 A
4 – 60 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.690,91	8.375,00 A	3.226,67 A	46,53 B
5 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3.118,89	9.041,67 A	3.395,00 A	46,97 A
6 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito	2.381,00	6.958,34 B	2.578,33 B	45,96 B
7 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.552,40	8.666,67 A	3.486,67 A	47,11 A
8 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito	2.428,47	7.791,67 B	2.798,33 B	45,62 B
9 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.627,68	8.291,67 A	3.271,67 A	47,56 A
10 – 600 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito + 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3.267,75	9.750,00 A	3.735,00 A	48,21 A
11 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro.	2.405,46	7.500,00 B	2.843,33 B	45,59 B
12 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro. + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.728,28	9.125,00 A	3.565,00 A	47,41 A
13 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro.	2.418,94	7.125,00 B	2.523,33 B	45,09 B
14 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro. + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.871,69	7.666,67 B	2.788,33 B	46,34 B
15 – 600 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro. + 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.522,96	8.166,67 B	3.265,00 A	46,28 B
16 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla.	2.837,97	8.500,00 A	3.098,33 B	45,69 B
17 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla. + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.446,60	7.666,67 B	3.028,33 B	46,24 B
18 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla	2.781,77	7.916,67 B	3.021,67 B	45,38 B
19 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla. + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.666,77	9.208,33 A	3.613,33 A	47,94 A
20- 600 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla. + 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.610,42	8.791,67 A	3.475,00 A	47,96 A
CV%	14,52	11,64	15,04	3,14

Médias seguidas de iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-knott ao nível de 5% de probabilidade

Para calcular o índice de eficiência agronômica (IEA), foi utilizado o gráfico com a produtividade de grão de milho em função da adubação com K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para estabelecer o padrão de comparação com a adubação utilizando os remineralizadores (Figura 3).

**Figura 3.** Produtividade de grão de milho de acordo com as doses de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



A partir do gráfico, foi possível calcular o máximo de produtividade na dose de 134,66 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> com produtividade de 3.403,61 kg.ha<sup>-1</sup> de grãos, sendo este valor o IEA de 100%. A equação de índice de eficiência agronômica utilizada foi a de Barnes e Kamprath (1975) adaptada:

$$IEA = \frac{P_i - P_0}{PSFT_i - P_0} \times 100$$

P<sub>i</sub>: Produção nas doses de K

P<sub>0</sub>: Produção na ausência de K

PSFT<sub>i</sub>: A produção no nível de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> considerado, estimada pela curva média de resposta à aplicação de níveis crescentes de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

$$IEA = \frac{(P_{rocha} - P_{controle})}{(PK_2SO_4 - P_{controle})} \times 100$$

Avaliando a produtividade com dose de 40 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> Fonolito + 20 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

$$IEA\ fonolito = \frac{(3486,67 - 3066,67)}{(3403,61 - 3066,67)} \times 100$$

IEA fonolito= 124,65%

Avaliando a produtividade com a dose de 40 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> Fonolito hidro. + 20 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

$$IEA\ fonolito\ hidrotermalizado = \frac{(3.565,00 - 3.066,67)}{(3.403,61 - 3.066,67)} \times 100$$

IEA fonolito hidrotermalizado 147,90%

O fonolito e o fonolito hidrotermalizado, quando usados em combinação com o sulfato de potássio, mostraram eficiência agronômica de 124,65% e 147,90%, respectivamente. O siltito glauconítico obteve valores inferiores ao controle, não tendo eficiência agronômica. O mesmo aconteceu para os remineralizadores, quando usados sem o sulfato de potássio.

Na Tabela 9, estão os resultados dos teores de nutrientes da parte aérea das plantas. É observado que não ocorreu diferença significativa entre os tratamentos em relação aos teores de nitrogênio e fósforo. Estes resultados já eram esperados devido à adubação igualitária em todas as parcelas com torta de mamona para fornecimento de nitrogênio e termofosfato para o fornecimento de fósforo para o crescimento e desenvolvimento do milho.

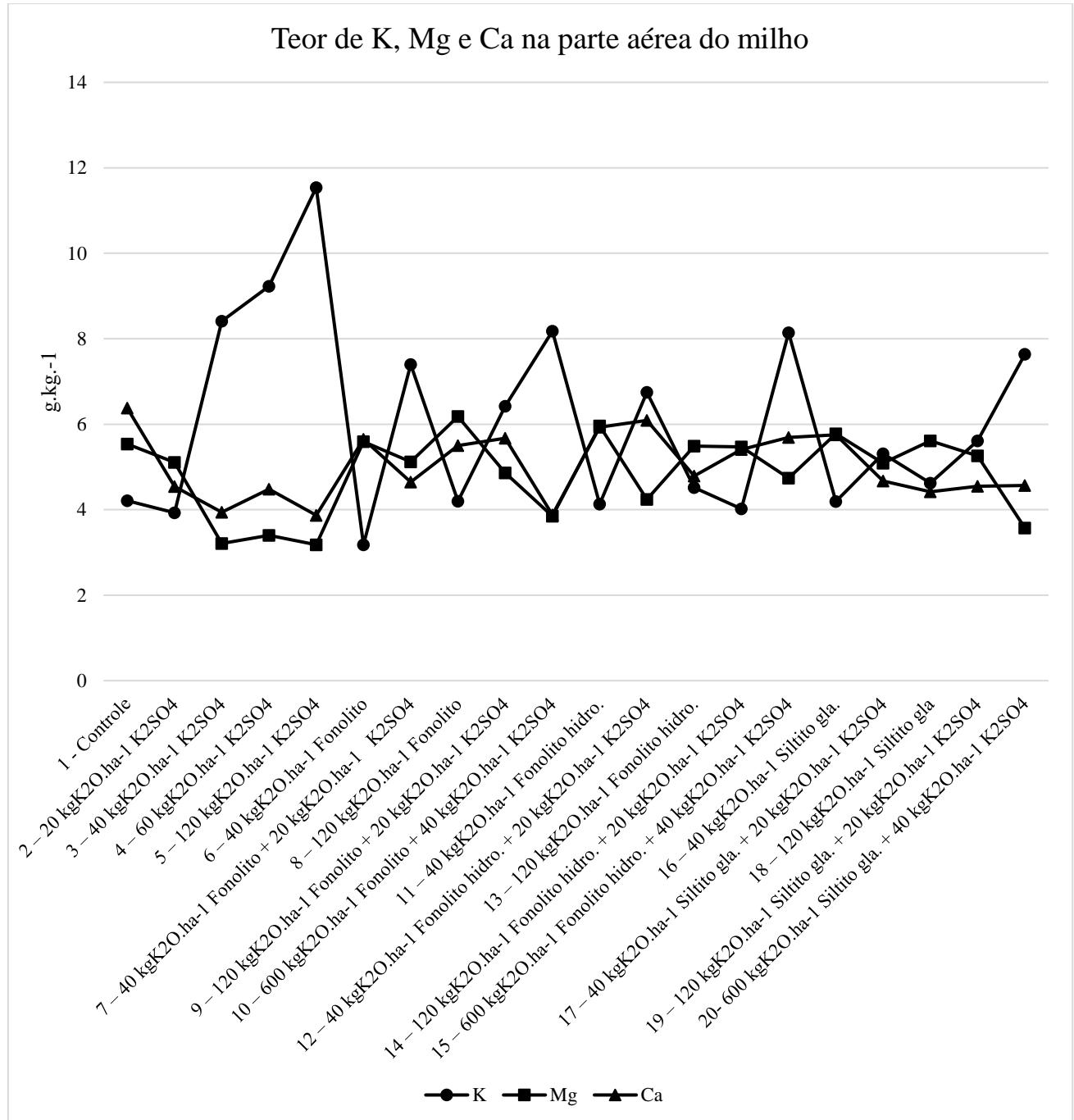
Em relação ao cálcio, o controle obteve maiores valores, sendo seguido pelo fonolito hidrotermalizado, siltito glauconítico e fonolito. Para magnésio, os maiores valores foram no fonolito, seguido pelo fonolito hidrotermalizado, siltito glauconítico e o controle. Os valores mais baixos foram na dose de 120 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, tanto para o Ca quanto Mg. Convém lembrar que o fonolito apresenta 1,0% de Ca e 0,15% de Mg; o fonolito hidrotermalizado 0,1% de Ca e 0,1% de Mg; o siltito glauconítico com 0,5% Mg. De acordo com Veloso et al. (2001), doses crescentes de potássio reduzem o acúmulo de magnésio na parte área das plantas de milho. No presente estudo, foi possível observar que, exceto para siltito glauconítico, esse comportamento não ocorreu (Figura 4).

**Tabela 9.** Teores de nitrogênio, potássio, magnésio, fósforo e cálcio na matéria seca da planta de milho cultivado em sistema orgânico de produção com uso diferentes doses de remineralizadores e sulfato de potássio

<b>Tratamento</b>	<b>N<sup>ns</sup></b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>P<sup>ns</sup></b>	<b>Ca</b>
	<b>-----g kg<sup>-1</sup>-----</b>				
1 - Controle	12,56	4,21 C	5,54 A	2,58	6,38 A
2 – 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	11,70	3,93 C	5,11 A	2,07	4,54 B
3 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	13,70	8,41 B	3,21 B	2,27	3,94 B
4 – 60 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	11,32	9,23 B	3,40 B	2,16	4,48 B
5 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	11,38	11,54 A	3,18 B	2,04	3,87 B
6 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito	13,20	3,18 C	5,59 A	2,31	5,65 A
7 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	11,45	7,40 B	5,12 A	2,18	4,65 B
8 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito	14,12	4,20 C	6,18 A	3,06	5,50 A
9 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	11,30	6,42 B	4,86 A	2,19	5,67 A
10 – 600 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito + 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	12,00	8,18 B	3,85 B	2,16	3,88 B
11 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro.	13,39	4,13 C	5,96 A	2,34	5,93 A
12 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro. + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	14,42	6,75 B	4,24 B	2,51	6,09 A
13 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro.	13,57	4,52 C	5,49 A	2,43	4,79 B
14 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro. + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	12,51	4,02 C	5,47 A	2,63	5,41 A
15 – 600 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro. + 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	11,38	8,14 B	4,74 A	2,46	5,69 A
16 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla.	12,07	4,19 C	5,78 A	3,14	5,75 A
17 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla. + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	11,09	5,31 C	5,09 A	2,19	4,67 B
18 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla	11,86	4,62 C	5,61 A	2,23	4,42 B
19 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla. + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	11,25	5,61 C	5,26 A	2,48	4,55 B
20- 600 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla. + 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	12,64	7,64 B	3,57 B	2,48	4,57 B
CV%	19,60	28,66	25,50	20,28	25,59
Letras iguais maiúsculas não diferem entre si nas colunas pelo teste de Skott Knot a 5% de significância					

Na Figura 4, é possível verificar que a discrepância entre o potássio e o magnésio e o cálcio são menores, quando utilizados os remineralizadores, reforçando que estes fornecem também outros macro e micronutrientes presentes em sua composição (Lapido-Loureiro & Nascimento 2008), o que as fontes mais solúveis, como o sulfato de potássio, não fornecem.

**Figura 4.** Teor de K, Mg e Ca na parte aérea do milho

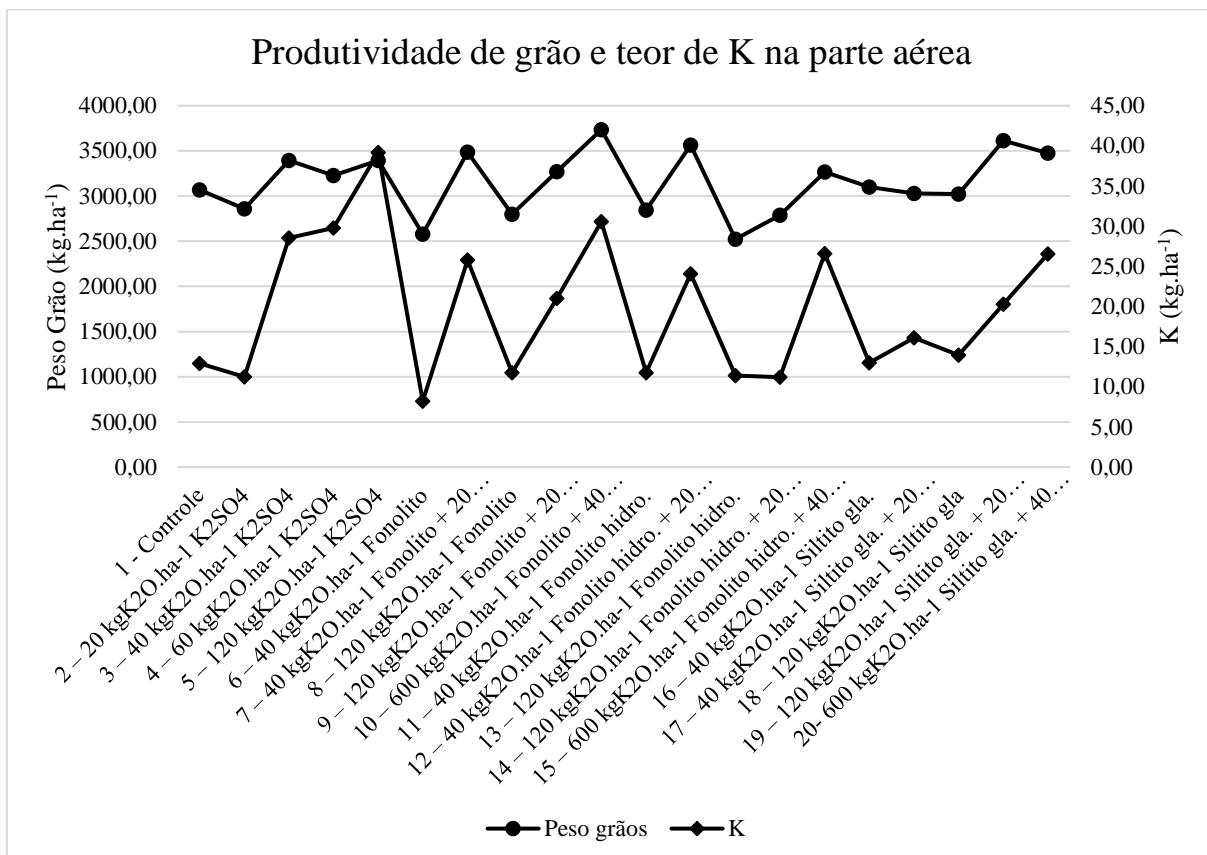


Em relação ao potássio, é possível relatar que os maiores teores desse macronutriente na parte aérea da planta refletiram em maior peso dos grãos. A dose de 120 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> foi a que obteve a maior teor de potássio, tendo diferença significativa em relação aos demais tratamentos. Igualmente ao comportamento no peso dos grãos, os remineralizadores utilizados

sem o sulfato de potássio não apresentaram diferença significativa do zero, enquanto estes, combinados com sulfato de potássio, obtiveram teores compatíveis com o K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Na Figura 5, é possível observar a relação diretamente proporcional em relação ao aumento do teor de potássio com o aumento do peso dos grãos.

**Figura 5.** Relação da produtividade de grãos de milho com o teor de potássio na parte aérea da planta



Calculando a eficiência agronômica com base nos teores de potássio

$$IEA = \frac{(T_{rocha} - T_{controle})}{(TK_2SO_4 - T_{controle})} \times 100$$

Avaliado o fonolito na dose de 40 kgK<sub>2</sub>O.ha⁻¹ Fonolito + 20 kgK<sub>2</sub>O.ha⁻¹ K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

$$IEA = \frac{(7,40 - 4,21)}{(11,54 - 4,21)} \times 100$$

IEA do fonolito 43,52%

Avaliado o fonolito hidrotermalizado na dose de 40 kgK<sub>2</sub>O.ha⁻¹ Fonolito hidro. + 20 kgK<sub>2</sub>O.ha⁻¹ K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

$$IEA = \frac{(6,42 - 4,21)}{(11,54 - 4,21)} \times 100$$

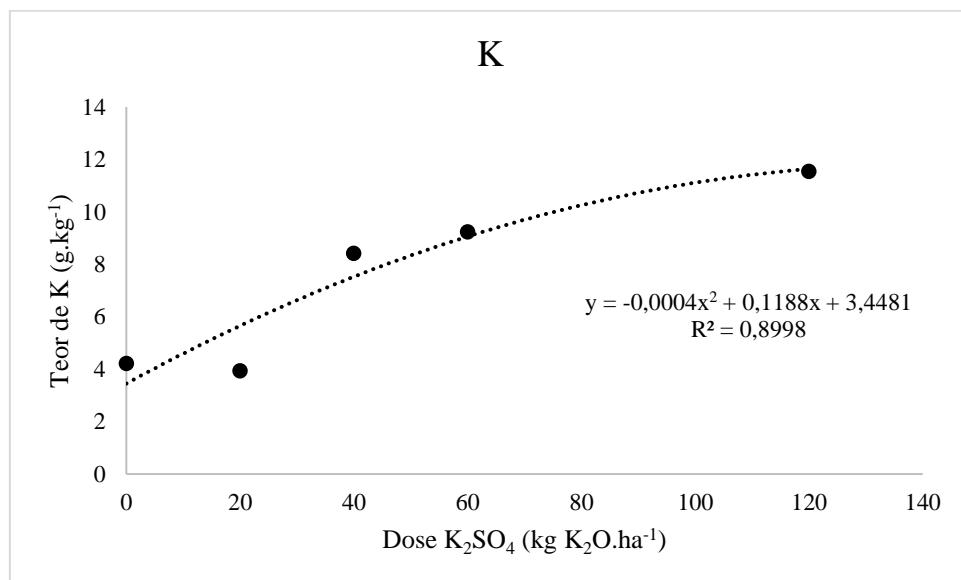
IEA fonolito hidrotermalizado 30,15%

Avaliando o siltito glauconítico na dose de 40 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> Siltito gla. + 20 kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

$$IEA = \frac{(5,31 - 4,21)}{(11,54 - 4,21)} \times 100$$

IEA do siltito glauconítico 15,00%

**Figura 6.** Gráfico de teor de potássio de acordo com doses crescentes de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



A Figura 6 foi utilizada como o padrão de eficiência de potássio. Assim, o valor utilizado foi de 11,54 g.kg<sup>-1</sup> para a dose de 120kgK<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> equivalendo a uma IEA de 100%.

O IEA dos remineralizadores para o fornecimento de potássio foi de 43,52%, 30,15% e 15% para o fonolito, fonolito hidrotermalizado e siltito glauconítico, respectivamente.

Em relação aos teores de nutrientes, na folha índice do milho, estes foram muito similares aos da parte aérea do milho, exibidos na Tabela 10.

**Tabela 10.** Teores de fósforo, potássio, magnésio e cálcio nas folhas índices das plantas de milho

<b>Tratamento</b>	P	K	Mg	Ca
	-----g kg <sup>-1</sup> -----			
1 - Controle	3,69 A	5,92 B	5,49 A	6,48 A
2 – 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3,42 A	6,93 B	4,53 A	5,27 B
3 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,88 B	8,91 A	3,16 B	5,29 B
4 – 60 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3,28 A	9,53 A	2,95 B	5,31 B
5 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,90 B	11,91 A	1,90 B	3,77 B
6 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito	3,28 A	5,76 B	5,91 A	7,27 A
7 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,95 B	7,96 A	3,79 B	5,60 B
8 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito	3,50 A	5,91 B	5,07 A	6,78 A
9 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,74 B	7,97 A	3,58 B	5,31 B
10 – 600 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito + 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,83 B	9,68 A	2,52 B	4,64 B
11 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro.	2,96 B	4,67 B	5,08 A	6,18 A
12 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro. + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,97 B	8,26 A	3,18 B	5,25 B
13 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro.	3,45 A	5,80 B	5,69 A	7,03 A
14 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro. + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3,20 B	6,04 B	5,37 A	6,79 A
15 – 600 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Fonolito hidro. + 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3,09 B	9,19 A	3,17 B	5,85 A
16 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla.	3,93 A	5,99 B	5,13 A	6,62 A
17 – 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla. + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3,55 A	7,28 B	4,51 A	6,20 A
18 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla	3,09 B	6,77 B	4,74 A	6,46 A
19 – 120 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla. + 20 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,92 B	9,22 A	3,96 B	5,52 B
20- 600 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> Siltito gla. + 40 kgK <sub>2</sub> O.ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,76 B	9,78 A	2,88 B	4,75 B
CV%	12,71	18,15	24,57	16,72

Letras iguais não diferem entre si nas colunas pelo teste de Scott Knott a 5% de significância

De modo semelhante ao comportamento do teor de potássio na matéria seca das plantas de milho mostrado anteriormente, o acúmulo de potássio na matéria seca e nos grãos apresenta a mesma distribuição e diferenças significativas (Tabela 11).

**Tabela 11.** Acúmulo de potássio nas plantas e grão de milho cultivado em sistema orgânico de produção com uso diferentes doses de remineralizadores e sulfato de potássio

Tratamento	Acúmulo de potássio ( $\text{kg K}_2\text{O}.ha^{-1}$ )
1 - Controle	26,64 C
2 – 20 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ $\text{K}_2\text{SO}_4$	24,64 C
3 – 40 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ $\text{K}_2\text{SO}_4$	44,15 B
4 – 60 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ $\text{K}_2\text{SO}_4$	37,15 B
5 – 120 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ $\text{K}_2\text{SO}_4$	58,37 A
6 – 40 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ Fonolito	23,66 C
7 – 40 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ Fonolito + 20 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ $\text{K}_2\text{SO}_4$	39,81 B
8 – 120 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ Fonolito	27,58 C
9 – 120 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ Fonolito + 20 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ $\text{K}_2\text{SO}_4$	36,80 B
10 – 600 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ Fonolito + 40 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ $\text{K}_2\text{SO}_4$	50,85 A
11 – 40 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ Fonolito hidro.	26,59 C
12 – 40 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ Fonolito hidro. + 20 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ $\text{K}_2\text{SO}_4$	39,06 B
13 – 120 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ Fonolito hidro.	25,33 C
14 – 120 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ Fonolito hidro. + 20 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ $\text{K}_2\text{SO}_4$	29,22 C
15 – 600 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ Fonolito hidro. + 40 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ $\text{K}_2\text{SO}_4$	40,98 B
16 – 40 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ Siltito gla.	30,30 C
17 – 40 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ Siltito gla. + 20 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ $\text{K}_2\text{SO}_4$	32,23 C
18 – 120 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ Siltito gla	30,73 C
19 – 120 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ Siltito gla. + 20 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ $\text{K}_2\text{SO}_4$	36,72 B
20- 600 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ Siltito gla. + 40 $\text{kgK}_2\text{O}.ha^{-1}$ $\text{K}_2\text{SO}_4$	41,63 B
CV%	24,64

Letras iguais não diferem entre si nas colunas pelo teste de Scott Knott a 5% de significância

De acordo com o estudo Boldrin et al. (2020), o uso de rochas de glauconita calcinada e fonolito isoladamente não é eficiente para fornecer K disponível para as plantas de milho. Concomitantemente, neste experimento, o fonolito também não apresentou incrementos semelhantes aos proporcionados pela fonte solúvel. Incrementos semelhantes só foram obtidos quando o fonolito foi aplicado juntamente com o sulfato de potássio. Estes, quando utilizados conjuntamente, elevaram a produtividade com IEA de mais de 100%. No entanto, o mesmo não aconteceu com a disponibilização de potássio, ficando a níveis razoáveis considerando uma fonte de liberação lenta de nutrientes em eficiências de 40%. Souza et al. (2010) também obtiveram 40% de eficiência agronômica do pó de rocha em relação ao KCl. Assi, é possível afirmar que os remineralizadores fonolito e fonolito hidrotermalizado apresentam eficiência agronômica em adubação conjugada, podendo, então, substituir parte da adubação potássica utilizada (50%), conduzindo ainda ao benefício de adubação com outros macronutrientes

presentes na sua composição e seu caráter básico. O sinergismo alcançado com a utilização das duas diferentes fontes, uma de liberação rápida (sulfato de potássio) e outra de liberação lenta (remineralizador), provavelmente é devido ao ciclo da cultura e às condições ambientais. O milho, com um ciclo de 90 dias, necessita prontamente de potássio para se desenvolver. Assim, no primeiro momento do seu desenvolvimento, a principal fonte de potássio é oriunda do sulfato de potássio, que é mais rápido. Conforme o ciclo avança, esta fonte sofre, por ser rapidamente disponível, lixiviação e, assim, o remineralizador passa a ser a fonte de potássio para a cultura.

O siltito glauconítico não apresentou eficiência agronômica, nem quando utilizado só e nem quando conjugado com sulfato de potássio, corroborando com os resultados de Santos (2013), que, ao avaliar feldspato, sienito e siltito glauconítico, na cultura do milheto, em solo arenoso, encontrou baixos valores de massa seca da parte aérea, sendo semelhantes à testemunha em duas doses avaliadas, de 50 e 100 mg dm<sup>-3</sup> de K<sub>2</sub>O.

## **B) EFICIÊNCIA AGRÔNOMICA DE REMINERALIZADORES NO CULTIVO DE BIOMASSA DE MILHO EM CONDIÇÕES DE CASA DE VEGETAÇÃO**

### **3.6. MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi instalado em casa de vegetação da Embrapa Agrobiologia, sediada no município de Seropédica, RJ. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados em esquema fatorial 2x8+1, com 17 tratamentos e três repetições, totalizando 51 unidades experimentais, com uso de vasos com capacidade 7 dm<sup>3</sup> (6kg de solo). Os tratamentos consistiram de diferentes doses de dois tipos de remineralizadores (fonolito hidrotermalizado com K<sub>2</sub>O total de 12% e fonolito com K<sub>2</sub>O total de 8%), correspondendo ao primeiro fator e o segundo fator as oito doses de remineralizadores utilizados (0,5%; 1%; 5%; 10%; 25%; 50%; 75% e 100%). Assim, o 0% correspondeu a utilização de solo sem remineralizador e o 100% correspondeu à utilização de remineralizador como substrato (sem solo). Os tratamentos foram: 1- 0% Fonolito + 100% solo; 2- 0,5% Fonolito + 99,5% solo; 3- 1% Fonolito + 99% solo; 4- 5% Fonolito + 95% solo; 5- 10% Fonolito + 90% solo; 6- 25% Fonolito + 75% solo; 7- 50% Fonolito + 50% solo; 8- 75% Fonolito + 25% solo; 9- 100% Fonolito + 0% solo; 10- 0,5% Fonolito hidro. + 99,5% solo; 11- 1% Fonolito hidro. + 99% solo; 12- 5% Fonolito hidro. + 95% solo; 13- 10% Fonolito hidro. + 90% solo; 14- 25% Fonolito hidro. + 75% solo; 15- 50% Fonolito hidro. + 50% solo; 16- 75% Fonolito hidro. + 25% solo; 17- 100% Fonolito hidro. +

0% solo. O solo utilizado correspondeu a um Planossolo Háplico contendo características arenosas (84 -87% areia), tendo sido retirado da área experimental da Embrapa Agrobiologia, cuja análise está na Tabela 12.

**Tabela 12.** Análise do solo utilizado no experimento de vasos

Al	Ca	H+Al ----- cmolc.dm <sup>-3</sup> -----	Mg	K	P -- mg.dm <sup>-3</sup> --	pH	N	C
							%	%
0,0	0,64	1,62	0,23	18,45	5,43	5,69	0,029	0,511

Foi utilizada adubação complementar de 13 g de superfosfato simples (18% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 5g de calcário dolomítico (87% PRNT), três aplicações de 0,78g de ureia e uma aplicação de 8mL de solução nutritiva de micronutrientes (Tabela 13) por vaso.

**Tabela 13.** Composição da solução de micronutrientes. Referência: FRANCO, Avílio A.; DÖBEREINER, Johanna. Especificidade hospedeira na simbiose com Rhizobium-Feijão e influência de diferente nutrientes. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 2, n. 1, p. 467-474, 1967.

	g.L <sup>-1</sup>
MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	150
CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	15,8
ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	8,908
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,3
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	0,5
FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	20
Ácido Cítrico	20

Após o preparo dos vasos, foi feito o plantio do milho, tendo sido utilizadas sementes híbridas AG1051 da Seminis, sendo mantidas três plantas por vaso. A irrigação foi manual e a coleta da planta de milho foi feita após 60 dias da semeadura, na fase vegetativa do milho. Para a determinação da biomassa seca, foi retirada a parte aérea e o sistema radicular da planta, tendo sido pesadas e levadas para a estufa de ventilação forçada, com temperatura de 65°C, até atingir massa constante. Após o processo de secagem, o material foi triturado em moinho de facas tipo Willey. As amostras foram encaminhas ao laboratório de Química Agrícola da Embrapa Agrobiologia para determinação do teor de macronutrientes. A análise de P, na biomassa, foi realizada pelo método colorimétrico, o K foi analisado por fotometria de chama e o Ca e o Mg pelo método de absorção atômica, de acordo com os procedimentos descritos por

Nogueira e Souza (2005). Foram também avaliadas as alturas máximas das plantas e o diâmetro, com o auxílio de trena e paquímetro, respectivamente.

A análise estatística dos dados foi feita no programa R 4.2.2 (R Core Team, 2022). Foi realizada análise de variância, tendo as médias sido comparadas por meio do teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, e as análises das doses por regressão linear.

### 3.7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação à massa seca da parte aérea, o fonolito apresentou maior produção comparativamente ao fonolito hidrotermalizado nas doses mais baixas de 0,5% e 1%. Nas doses de 5%, 10% e 25%, não houve diferença significativa entre eles e, em doses mais altas de 50%, 75% e 100%, o fonolito hidrotermalizado apresentou maior produção (Tabela 14). Nas doses de 50%, 75% e 100% de fonolito, a produção de matéria seca foi abaixo do observado no controle e isso pode ter sido decorrente possivelmente da redução da porosidade do substrato, já que o fonolito apresenta partículas muito finas. Em relação à massa seca do sistema radicular, o fonolito não apresentou diferença significativa em relação ao fonolito hidrotermalizado na dose de 0,5% a 50%. Na dose de 75% e 100%, o fonolito apresentou significativamente menores valores que o controle. Referente à altura das plantas, não houve diferença significativa, exceto na dose de 100%, na qual o fonolito hidrotermalizado apresentou valores maiores. Em relação ao diâmetro, também não houve diferença significativa, com exceção da dose de 25%, na qual o fonolito apresentou maior diâmetro do que o fonolito hidro. O fonolito apresentou limitação física e química em altas doses, tendo se tornado prejudicial para o desenvolvimento das plantas.

**Tabela 14.** Produção de massa seca da parte aérea, da raiz, altura e diâmetro das plantas de milho cultivadas em vasos usando remineralizadores como substrato

%	Remineralizador							
	Fonolito	Fonolito Hidro.	Fonolito	Fonolito Hidro.	Fonolito	Fonolito Hidro.	Fonolito	Fonolito Hidro.
	Massa seca parte aérea		Massa seca Raiz		Altura		Diâmetro	
----- g -----								
0	55,7 a	55,7 a	20,8 a	20,8 a	133,67 a	133,67 a	1,11 a	1,11 a
0,5	71,57 a	39,52 b	24,54 a	10,16 a	148,43 a	133,10 a	1,17 a	1,19 a
1	79,64 a	52,89 b	23,78 a	19,62 a	139,90 a	130,90 a	1,24 a	1,38 a
5	85,45 a	74,99 a	30,38 a	21,50 a	142,27 a	142,83 a	0,87 a	1,13 a
10	77,08 a	90,58 a	42,82 a	49,52 a	150,40 a	145,67 a	1,23 a	1,05 a

25	72,66 a	91,07 a	47,31 a	40,26 a	149,37 a	147,93 a	1,32 a	0,89 b
50	38,36 b	81,49 a	25,46 a	23,94 a	118,00 a	139,40 a	1,13 a	0,91 a
75	48,73 b	108,87 a	15,90 b	40,85 a	147,37 a	158,20 a	1,18 a	1,19 a
100	32,22 b	127,69 a	8,08 b	34,21 a	86,17 b	148,00 a	1,43 a	1,29 a
Total	62,38 b	80,31 a	26,56 a	28,98 a	135,06 a	142,19 a	1,19 a	1,13 a
CV%	16,7		45,28		12,02		14,23	

Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de significância

Na Tabela 15, estão apresentados os resultados da análise de nutrientes na parte aérea do milho. Não houve diferença significativa entre o fonolito e o fonolito hidrotermalizado nas doses de 0,5% a 25% e 100% em relação ao potássio. Houve diferença significativa nas doses de 50% e 75%, sendo o fonolito o que apresentou maiores teores de K. Apesar do fonolito hidro. apresentar um teor de K<sub>2</sub>O total de 12%, maior que o K<sub>2</sub>O total do fonolito (8% K<sub>2</sub>O), o fonolito obteve os maiores teores de K na parte aérea das plantas de milho com o valor máximo de 22,58 g.kg<sup>-1</sup> na dose de 75%. Em relação ao cálcio, o fonolito hidro. apresentou maiores valores nas doses de 0,5% e 1%. Por sua vez, o fonolito apresentou maiores valores nas doses 50%, 75% e 100%. Nas doses restantes, não houve diferença significativa entre os dois remineralizadores. Para magnésio, o fonolito hidro. apresentou diferença significativa nas doses de 0,5%, 1% e 10% para mais e o fonolito na dose de 100%. Nas restantes, não teve diferença significativa. No fósforo, houve diferença significativa na qual o fonolito hidro. teve valores mais altos nas doses de 0,5%, 1%, 5%, 10% e 25%.

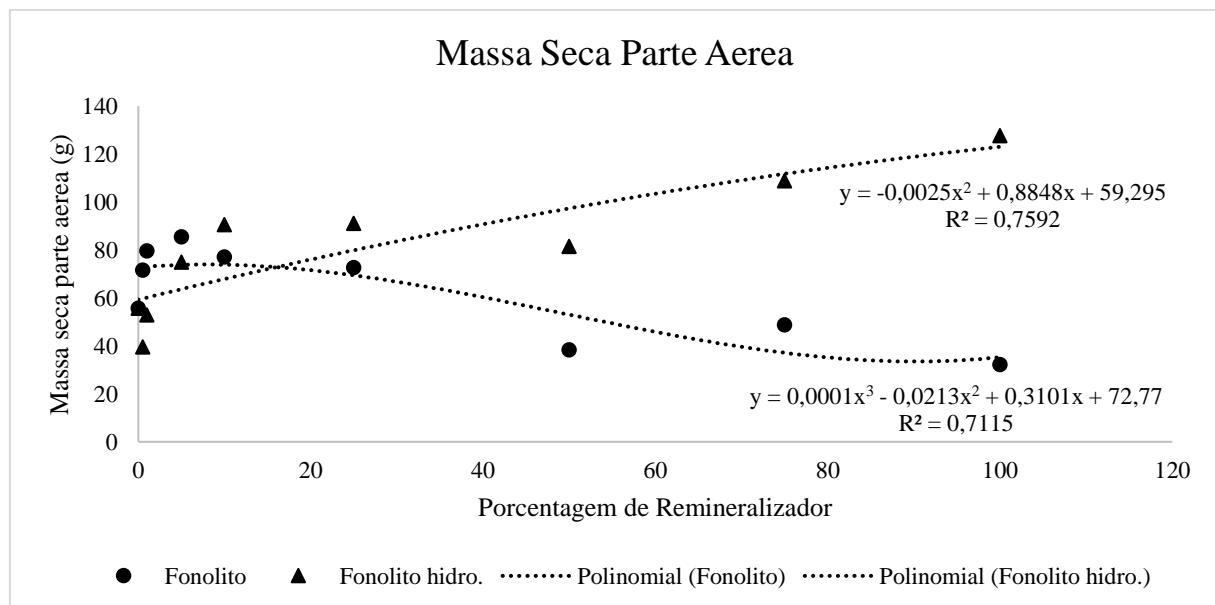
**Tabela 15.** Teor de nutrientes (K, Ca, Mg e P) na parte aérea das plantas de milho cultivadas em vasos usando remineralizadores como substrato

%	Remineralizador							
	Fonolito	Fonolito Hidro.	Fonolito	Fonolito Hidro.	Fonolito	Fonolito Hidro.	Fonolito	Fonolito Hidro.
----- g.kg <sup>-1</sup> -----								
0	2,56 a	2,56 a	4,41 a	4,41 a	7,09 a	7,09 a	4,53 a	4,53 a
0,5	2,97 a	5,12 a	3,38 b	4,92 a	5,69 b	7,20 a	2,33 b	4,62 a
1	3,89 a	2,60 a	3,49 b	5,04 a	5,45 b	7,32 a	2,00 b	4,04 a
5	5,10 a	3,88 a	2,80 a	3,33 a	4,77 a	5,08 a	1,32 b	2,80 a
10	6,98 a	4,18 a	2,40 a	2,97 a	3,40 b	4,50 a	1,15 b	2,44 a
25	11,40 a	7,86 a	2,17 a	1,81 a	2,27 a	2,59 a	1,02 b	1,73 a
50	20,31 a	15,50 b	2,70 a	1,69 b	2,08 a	1,94 a	1,10 a	1,23 a
75	22,58 a	16,30 b	2,26 a	1,30 b	1,60 a	1,22 a	0,96 a	1,20 a
100	18,39 a	18,92 a	2,22 a	1,25 b	2,11 a	0,90 b	1,31 a	1,14 a
Total	10,46 a	8,55 b	2,87 a	2,97 a	3,83 b	4,20 a	1,75 b	2,63 a

CV%	26,66	13,08	14,00	11,86
Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de significância				

Na Figura 7, podemos observar a regressão que mais representa os dados de massa seca da parte aérea das plantas de milho. O ponto máximo do fonolito é a 7,82% na sua composição do solo, que corresponde a uma dose equivalente de 10.451,93 kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> e apresenta um peso de 73,96g de massa seca. O ponto máximo do fonolito hidrotermalizado é a 125,07% na sua composição do solo, o que corresponde a uma dose de 242.830,14 kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> e apresenta um peso de 124,25g de massa seca. No comportamento das equações, podemos observar que o fonolito hidrotermalizado não tem inibição no aumento de massa, conforme este aumenta a sua quantidade em até 100%. Ou seja, funciona como um substrato sem a necessidade de solo. Ao contrário do fonolito, que a sua eficiência está entre o 0,5% e 25%, após estas doses, este remineralizador começa a ser inibitório para o aumento de massa. Para ocorrer um aumento de massa de 1,67 vezes, é necessário 23,23 vezes mais fonolito hidrotermalizado, mostrando que, em menores quantidades, o fonolito é mais eficiente, gerando menos custos.

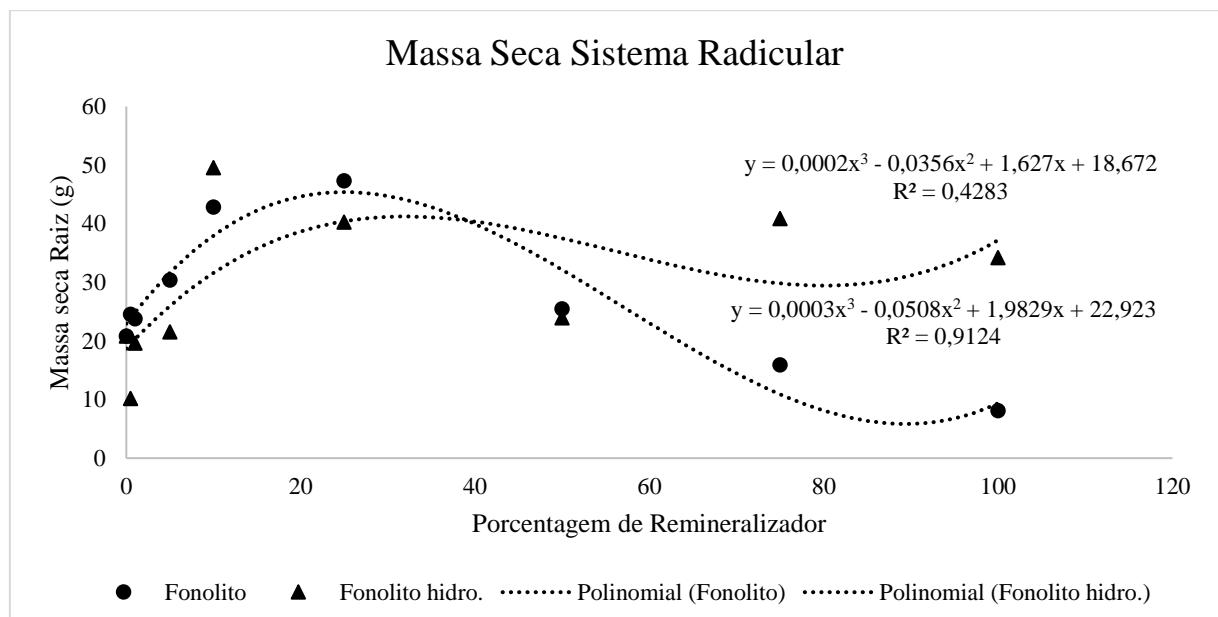
**Figura 7.** Massa seca da parte aérea das plantas de milho em função das porcentagens de remineralizador aplicado



Na Figura 8, para a massa seca do sistema radicular das plantas de milho, podemos observar que o valor máximo de massa, no caso do fonolito hidrotermalizado, é observado em 30,89%, que corresponde a uma dose de 59.974,60 kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>, com produção de 40,86g de

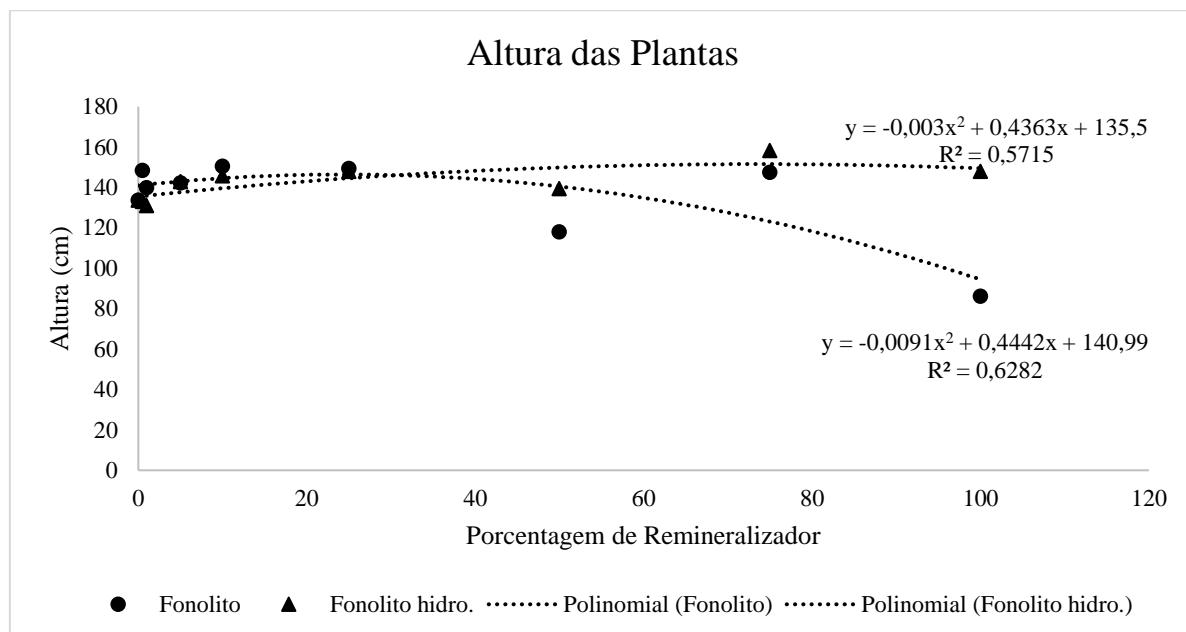
massa seca. No fonolito, o máximo se dá em 25,46%, correspondente a uma dose de 34.028,93 kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>, com produção de 45,46 g de massa seca de raiz. Uma dose 1,76 vezes menor de fonolito obteve aproximadamente os mesmos resultados que o fonolito hidrotermalizado.

**Figura 8.** Massa seca do sistema radicular das plantas de milho em função das porcentagens de remineralizador aplicado



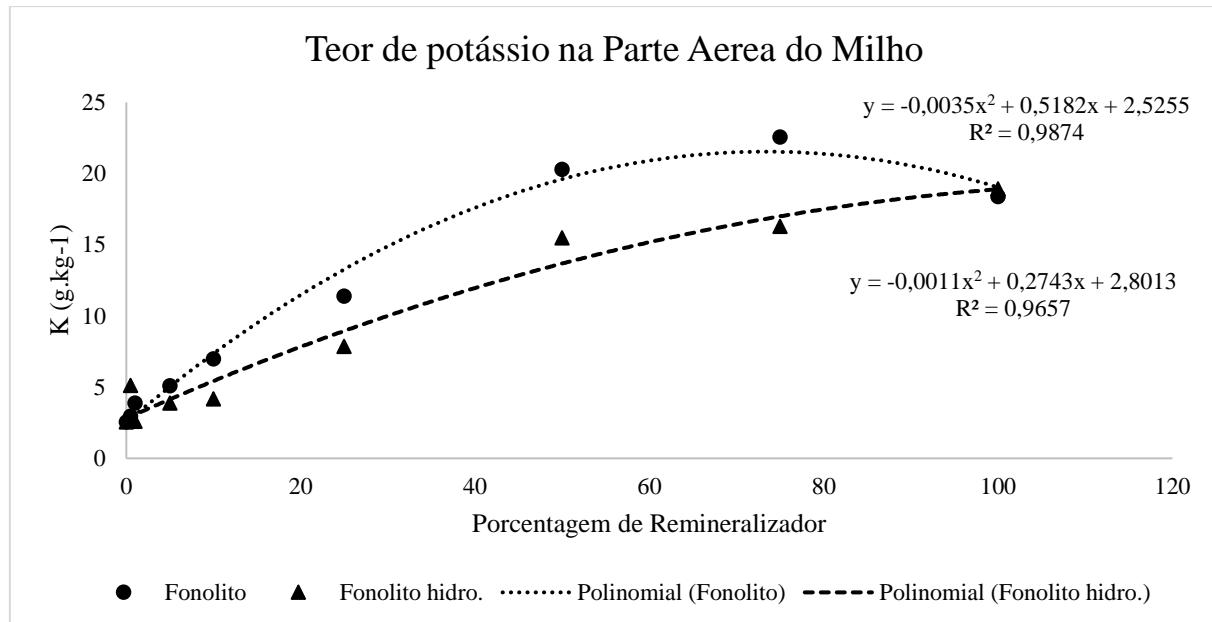
Na Figura 9, para o fonolito hidrotermalizado, podemos observar que não houve diferença entre as alturas das plantas de milho até por volta da dose de 60%, na qual os valores se mantiveram constantes, enquanto que, para o fonolito, as alturas das plantas foram diminuindo.

**Figura 9.** Alturas das plantas de milho em função das porcentagens de remineralizadores adicionadas



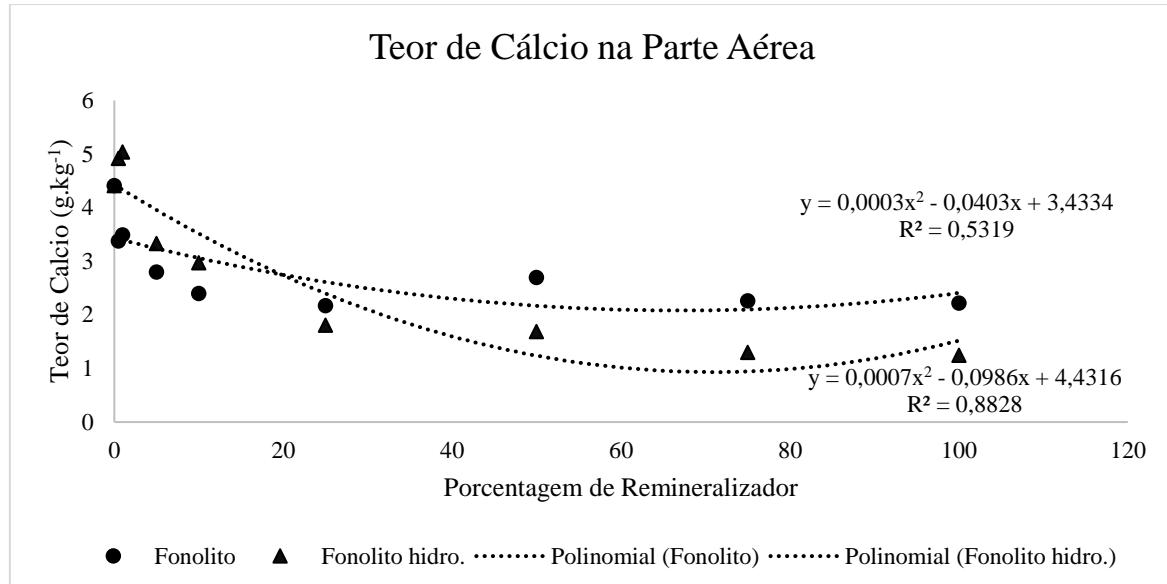
Na Figura 10, que representa o teor de potássio na parte aérea das plantas de milho, o máximo de extração no fonolito foi a 74,03%, correspondente a uma dose de 98.945,87 kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> e com extração de 21,73 g.kg<sup>-1</sup> de K. Com a aplicação de fonolito hidrotermalizado, a porcentagem máxima foi de 124,23%, que corresponde a uma dose de 241.199,23 kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> com uma extração de 19,86 g.kg<sup>-1</sup> de K. Na parte aérea das plantas, a eficiência de teor de potássio foi mais elevada com a aplicação de fonolito, pois, em doses menores, foi possível obter maior teor de K na planta. Por sua vez, para o fonolito hidrotermalizado, foi necessário mais de 2,44 vezes de remineralizador para obter resultado similar.

**Figura 10.** Teor de potássio na parte aérea das plantas de milho

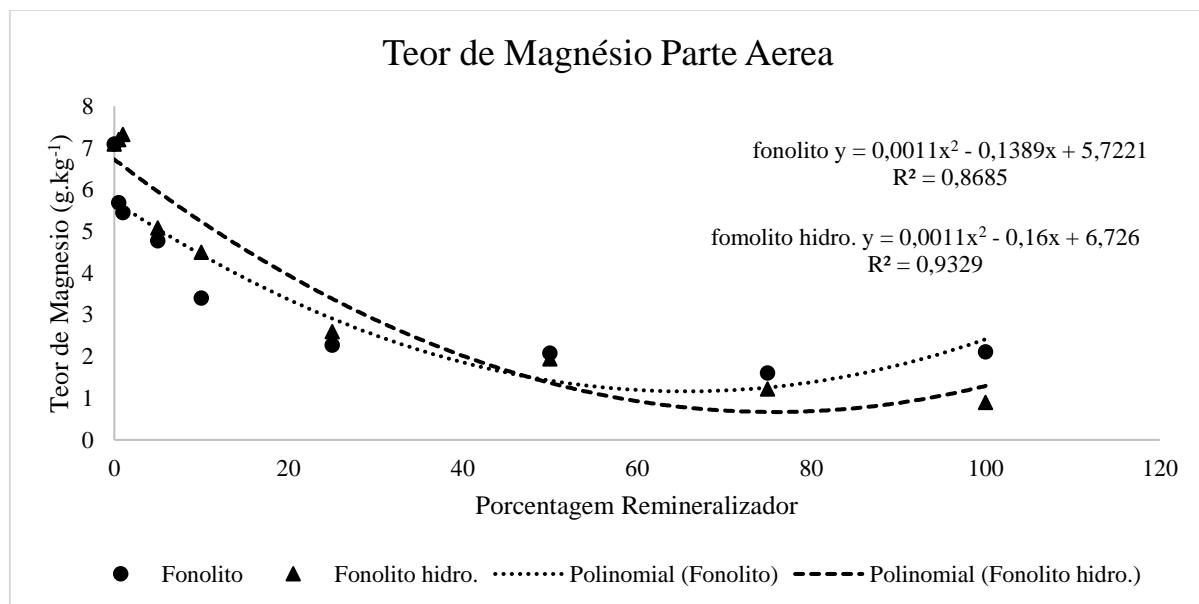


Nas Figuras 11, 12 e 13, temos os teores de cálcio, magnésio e fósforo na parte aérea das plantas de milho. Observa-se que comportamento do fonolito e o do fonolito hidrotermalizado são bem semelhantes e que os nutrientes apresentam teores mais altos no controle, ou seja, sem a utilização de adubação potássica, e que vão diminuindo, conforme aumenta a dose de remineralizador e, por consequência, a dose de potássio. De acordo com Veloso et al. (2001), doses crescentes de potássio reduziram o acúmulo de magnésio na parte aérea de plantas de milho, o mesmo tendo sido observado no presente experimento, sendo as curvas espelhadas.

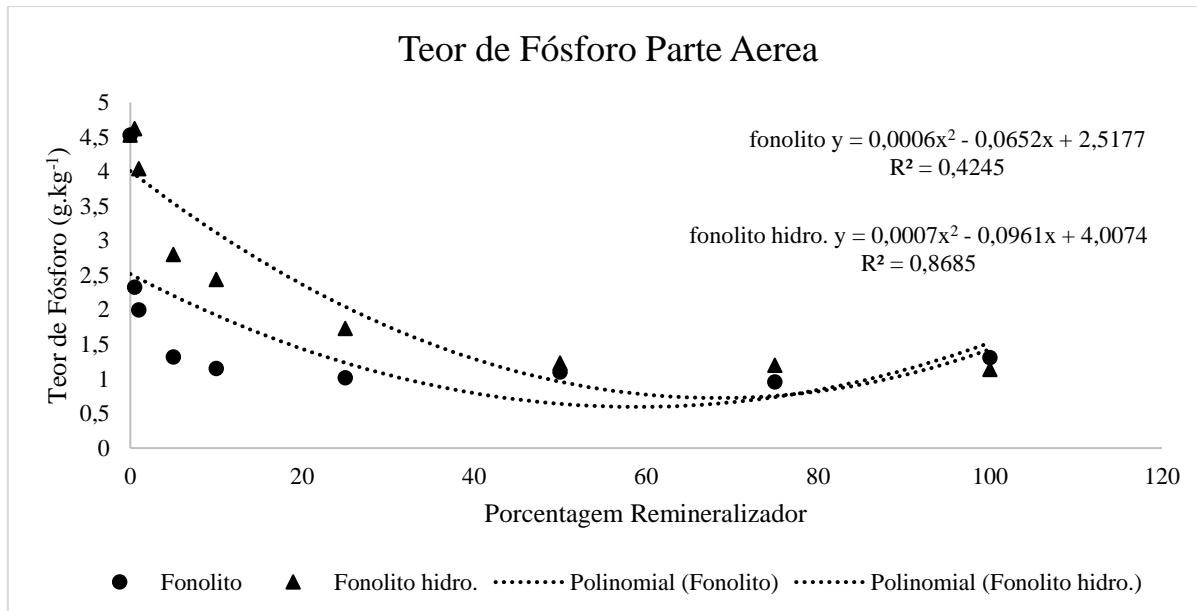
**Figura 11.** Teor de cálcio na parte aérea das plantas de milho



**Figura 12.** Teor de magnésio na parte aérea das plantas de milho



**Figura 13.** Teor de fósforo na parte aérea das plantas de milho



### 3.8. CONCLUSÕES

No experimento de campo, a adubação com  $K_2SO_4$  incrementou a produtividade do milho em cerca de 12% em relação ao tratamento controle absoluto. Referente ao efeito da aplicação dos remineralizadores sobre a produtividade do milho, foi observado que o fonolito apresentou resultados mais promissores do que o fonolito hidrotermalizado e o siltito glauconítico. O uso da adubação mista (remineralizador + sulfato de potássio) apresentou incrementos na produtividade, sugerindo que os remineralizadores têm potencial de substituição de 50% das fontes convencionais de K, por meio da utilização de rochas brasileiras, e de diminuição da dependência no uso de fertilizantes solúveis, apresentando, assim, uma solução para o suprimento de adubação potássica. Os remineralizadores utilizados em adubação sem o  $K_2SO_4$  não causaram incremento da produtividade e não proporcionaram eficiência agronômica, quando utilizados como total substituição da adubação potássica.

No experimento de casa de vegetação, a adubação potássica com fonolito incrementou em 40% a produtividade de massa seca e o fonolito hidrotermalizado em 65% da produtividade, comparado com o controle sem uso de adubação potássica. O fonolito se mostrou mais eficiente, pois, com menores quantidades, conseguir chegar a melhores produtividades e teores de K na matéria seca. No entanto, o seu uso em dose muito alta pode ser prejudicial. O fonolito hidrotermalizado, por sua vez, não apresentou danos para as produtividades com o aumento de sua dosagem, podendo até ser utilizado como substrato para o desenvolvimento das plantas.

## **4. CAPÍTULO II**

### **SOLUBILIDADE DOS REMINERALIZADORES EM DIFERENTES ÁCIDOS ORGÂNICOS**

#### **4.1. RESUMO**

O Brasil se encontra num cenário de dependência externa de insumos, sendo o potássio o elemento mais importado. Os remineralizadores foram inseridos no Plano Nacional de Fertilizantes por serem considerados uma possível alternativa aos fertilizantes potássicos utilizados e de produção nacional. Apesar de promissores, os remineralizadores apresentam dois problemas principais. O primeiro é a baixa reatividade e solubilidade dos minerais e o segundo são os baixos teores de nutrientes das fontes. A baixa solubilidade se deve ao potássio presente nos minerais, que se encontra na forma de potássio estrutural, o qual somente é liberado para a solução do solo quando esses minerais são intemperizados. A relação que se tem mostrado mais favorável para a solubilização de minerais de rocha é a redução do pH no meio, que leva à produção de ácidos orgânicos. Acredita-se que a solubilização de nutrientes dos remineralizadores com a utilização de ácidos orgânicos simula as reações naturais de intemperismo que ocorrem no solo. Tais características tornam possível verificar a viabilidade do uso de remineralizadores, assim como a viabilidade do uso de outros processos que, indiretamente, possam produzir ácidos orgânicos como produto (compostagem, fermentação, microrganismos), com o objetivo de aumentar a sua solubilidade e consequente produtividade das plantas. Nestas condições, o experimento deste estudo tem como objetivo avaliar a solubilidade de três remineralizadores na presença de diferentes ácidos orgânicos. O experimento foi realizado no Laboratório de Agricultura Orgânica e no Laboratório de Química Agrícola da Embrapa Agrobiologia, sediada no município de Seropédica, RJ. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com quatro repetições, em esquema fatorial 3x5, onde o primeiro fator corresponde aos remineralizadores (fonolito, fonolito hidrotermalizado e siltito glauconítico) e o segundo representa cinco tempos de agitação (1; 3; 5; 8 e 16 horas a 80 oscilações por minuto). O experimento foi realizado quatro vezes, uma para cada tipo de solução: ácido cítrico ( $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ ); ácido acético ( $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ ); ácido lático ( $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ ); e água destilada. Foram pesadas amostras de 0,500g de cada um dos remineralizadores, colocadas em tubos Falcon de plásticos de 50mL e adicionados 50mL de cada uma das soluções, obtendo uma relação massa/volume de 1:100. O ácido cítrico e o ácido

lático foram as soluções extratoras que mais solubilizaram os nutrientes no fonolito. O fonolito teve maior potencial de solubilização de potássio com  $86,09 \text{ mg K}_2\text{O.L}^{-1}$  apresentando 0,86 % de  $\text{K}_2\text{O}$  solubilizado em ácido cítrico, contrastando com a solubilidade em água de  $2,32 \text{ mg K}_2\text{O.L}^{-1}$  correspondente a 0,0232% de solubilização. O fonolito hidrotermalizado e o siltito glauconítico não tiveram eficiência de extração de nutrientes com nenhuma das soluções utilizadas. As soluções de ácido cítrico e ácido lático a 2% são promissoras para quantificar os nutrientes disponíveis.

**Palavras-chave:** fonolito; fonolito hidrotermalizado; siltito glauconítico; ácidos orgânicos; potássio

#### 4.2. ABSTRACT

Brazil is in a scenario of external dependency on inputs, with potassium being the most imported element. Remineralizers have been included in the National Fertilizer Plan as a potential alternative to the potassium fertilizers used and produced domestically. Despite their promise, remineralizers present two main issues. The first is the low reactivity and solubility of the minerals, and the second is the low nutrient content of the sources. The low solubility occurs because the potassium present in the minerals is in the form of structural potassium, which is only released into the soil solution when these minerals undergo weathering. The relationship that has shown the most promise for the solubilization of rock minerals is the reduction of pH due to the production of organic acids. Thus, it is believed that the solubilization of nutrients from remineralizers using organic acids simulates the natural weathering reactions that occur in the soil, allowing for the analysis of the viability of remineralizers as well as the feasibility of using other processes that indirectly produce organic acids as a byproduct (such as composting, fermentation, and microorganisms) to increase their solubility and consequently enhance plant productivity. The experiment aims to evaluate the solubility of three remineralizers in different organic acids. It was conducted in the organic agriculture laboratory and the agricultural chemistry laboratory at Embrapa Agrobiologia, located in Seropédica, RJ. The experimental design used was completely randomized with four repetitions in a factorial scheme of  $3 \times 5$ , where the first factor corresponds to the remineralizers (phonolite, hydrothermalized phonolite, and glauconitic siltstone) and the second represents five agitation times (1, 3, 5, 8, and 16 hours at 80 oscillations per minute). The experiment was conducted

four times, once for each type of solution: citric acid ( $0.02 \text{ mol.L}^{-1}$ ), acetic acid ( $0.02 \text{ mol.L}^{-1}$ ), lactic acid ( $0.02 \text{ mol.L}^{-1}$ ), and distilled water. Samples of 0.500g of each remineralizer were weighed, placed in 50 mL plastic Falcon tubes, and 50 mL of each solution was added, achieving a mass/volume ratio of 1:100. Citric acid and lactic acid were the extracting solutions that most effectively solubilized the nutrients in the phonolite. The phonolite had the highest potassium solubilization potential with 86.09 mg K<sub>2</sub>O.L<sup>-1</sup>, showing 0.86% K<sub>2</sub>O solubilized in citric acid, contrasting with the water solubility of 2.32 mg K<sub>2</sub>O.L<sup>-1</sup>, which corresponds to 0.0232% solubilization. Hydrothermal phonolite and glauconitic siltstone did not show extraction efficiency for nutrients with any of the solutions used. The 2% solutions of citric acid and lactic acid are promising for quantifying the available nutrients.

**Keywords:** Phonolite; Hydrothermally Phonolite; Glauconitic Siltstone; Organic Acids; Potassium

### 4.3. INTRODUÇÃO

O Brasil encontra-se em um cenário de dependência externa de insumos, sendo o potássio o elemento mais importado e o cloreto de potássio (KCl) a principal fonte consumida. Segundo a Agência Nacional de Mineração (2022), a produção nacional de KCl foi de apenas 5% de todo o consumo interno aparente, sendo o restante importado. Nesse contexto, pesquisas com fontes alternativas de nutrientes visam atender à demanda crescente por insumos e, também, gerar tecnologias aplicáveis aos sistemas orgânicos de produção, apontados como capazes de melhorar a sustentabilidade da produção agrícola em relação aos sistemas convencionais utilizados nesse setor produtivo. Outro problema recorrente nesse contexto é a destinação adequada de volumes crescentes de resíduos da mineração.

Os remineralizadores foram inseridos no Plano Nacional de Fertilizantes por serem considerados uma possível alternativa aos fertilizantes potássicos utilizados e de produção nacional. Os remineralizadores são parte de uma categoria específica de insumo agrícola estabelecida pela legislação dos fertilizantes. A Lei nº 12.890/2013 (Brasil, 2013) define os remineralizadores como sendo todo material que tenha sofrido apenas processos de redução de tamanho de partículas e que altere os índices de fertilidade do solo, por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promova a melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas ou da atividade biológica do solo. Muitos remineralizadores são resíduos da mineração e, apesar de promissores para uso agrícola, apresentam dois problemas principais. O

primeiro é a baixa reatividade e solubilidade dos minerais e o segundo são os baixos teores de nutrientes das fontes (STRAATEN, 2006).

A baixa solubilidade dos remineralizadores se deve ao fato do potássio presente nos minerais encontrar-se na forma de potássio estrutural, ressaltando que o K faz parte da estrutura dos minerais primários e ou secundários (NOVAIS et al., 2007). O potássio somente é liberado para a solução do solo quando os minerais são intemperizados. Como a intemperização é um processo lento, as quantidades liberadas por esse mecanismo são, na maioria, pequenas e insuficientes para suprir a demanda das plantas, especialmente, daquelas de ciclo curto. O intemperismo é um processo que depende de fatores físicos, químicos e biológicos, sendo favorecido por condições de elevada umidade e temperatura. As principais fontes naturais de K no solo provêm do intemperismo químico dos minerais primários. A hidrólise é o principal desses processos, no qual íons de H<sup>+</sup> atacam as ligações que unem o K na estrutura dos minerais (NOVAIS et al., 2007).

A relação que se tem mostrado mais provável para a solubilização de minerais de rocha é a redução do pH no meio decorrente da produção de ácidos orgânicos (LIAN et al., 2008; BIN et al., 2010; MEENA et al., 2014; VASSILEV et al., 2006). Os ácidos orgânicos oxálico, tartárico, glucônico, cítrico, málico e succínico são os mais liberados durante a solubilização de K (SHENG e HE, 2006; PRAJAPATI et al., 2012).

Os ácidos orgânicos presentes na matéria orgânica, exsudados por microrganismos e plantas, podem aumentar a liberação de potássio presente em minerais para o solo, atuando com a formação de complexos organometálicos ou liberação de H<sup>+</sup> (MACHADO, 2016), sendo relacionados a múltiplos processos no solo.

Apesar de a legislação exigir vários requisitos para classificação e registro dos pós de rocha como remineralizadores (Brasil, 2013; Brasil, 2016), existem poucos estudos sobre qual seria a quantidade mínima de nutrientes que devem ser liberados num determinado tempo, qual seria a granulometria e qual a sua correlação com a produção vegetal para viabilizar o uso de remineralizadores. Várias pesquisas são feitas utilizando ácidos orgânicos em diferentes concentrações, na tentativa de simular as reações naturais de intemperismo que ocorrem no solo, para avaliar o potencial de solubilização de minerais das rochas (Huang & Keller, 1970; Ramos, 2014; Azevedo, 2014). Um dos critérios de garantia mínima na legislação se refere ao total da soma de bases (CaO+MgO+K<sub>2</sub>O), que deve ser igual ou superior a 9%, e o K<sub>2</sub>O superior a 1%. No entanto, não existe garantia de liberação de nutrientes após aplicação aos solos. Assim, acredita-se que a solubilização de nutrientes dos remineralizadores usando ácidos

orgânicos simule as reações naturais de intemperismo que ocorrem no solo e possibilite analisar a viabilidade de remineralizadores. Além disso, tais condições poderiam mostrar a viabilidade de usos de outros processos que indiretamente resultam na produção de ácidos orgânicos (compostagem, fermentação, microrganismos), com o objetivo de aumentar a sua solubilidade e consequente produtividade das plantas. Nesse contexto, o experimento apresentado neste trabalho tem como objetivo avaliar a solubilidade de três remineralizadores em diferentes ácidos orgânicos.

#### **4.4. SOLUBILIDADE DOS REMINERALIZADORES EM DIFERENTES ÁCIDOS ORGÂNICOS**

##### **4.4.1. MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi realizado no Laboratório de Agricultura Orgânica e no Laboratório de Química Agrícola da Embrapa Agrobiologia, sediada no município de Seropédica, RJ. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com quatro repetições em esquema fatorial 3x5, onde o primeiro fator corresponde aos remineralizadores (fonolito, fonolito hidrotermalizado e siltito glauconítico) e o segundo representa cinco tempos de agitação (1; 3; 5; 8 e 16 horas a 80 oscilações por minuto). O experimento foi realizado quatro vezes, uma para cada tipo de solução: ácido cítrico ( $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ ); ácido acético ( $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ ); ácido lático ( $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ ); e água destilada. Foi adotada a metodologia proposta por Aceman (1989) e utilizada por Ribeiro (2018) e, também, foram respeitadas as normativas propostas pelo MAPA, através da Instrução Normativa nº 46 de 22 de novembro de 2016, com relação à solubilidade dos nutrientes, com aplicação de teor total e teor solúvel em ácido cítrico a 2%, relação 1:100 (m:v). Assim, foram pesadas amostras de 0,500g de cada um dos remineralizadores, colocadas em tubos Falcon de plásticos de 50ml e adicionados 50ml de cada uma das soluções, obtendo uma relação massa/volume de 1:100. Os tubos foram colocados em um agitador por períodos diferenciados de 1; 3; 5; 8 e 16 horas, com 80 oscilações por minuto e temperatura ambiente de 25°C. Nos períodos de agitação mais extensos, os tubos ficaram em repouso e posterior agitação até completar o tempo estipulado. Após a agitação, os tubos foram armazenados em refrigerador para posterior quantificação dos elementos no Laboratório de Química Agrícola da Embrapa Agrobiologia, utilizando-se os procedimentos baseados no Manual de Laboratórios: Solo, Água, Nutrição Animal e Alimentos (Nogueira e Souza, 2005). A análise estatística dos dados foi feita com o programa R 4.2.2 (R Core Team, 2022). Foi

utilizada análise de variância e as médias foram comparadas por meio do teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade. Análises do tempo foram realizadas por regressão linear.

O pH e a condutividade elétrica das soluções utilizadas no experimento são apresentados na Tabela 16.

**Tabela 16.** Valores de pH e condutividade elétrica das soluções solventes utilizadas no experimento

	pH	Condutividade Elétrica ( $\mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )
Ácido cítrico	2,49	2530
Ácido lático	2,48	2180
Ácido acético	3,24	412
Água destilada	5,72	2,66

#### 4.4.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 17, estão apresentados os resultados de pH e condutividade elétrica (CE) dos remineralizadores em água destilada. Como referência, a água tem pH de 5,72 e CE de  $2,66 \mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ . Os três remineralizadores tiveram pouca influência na mudança do pH. Mesmo assim, houve diferença significativa, ficando o siltito gla. com os maiores valores de 5,84, seguido do fonolito hidro. com 5,73 e, por último, o fonolito com 5,60. A condutividade elétrica foi aumentada pelos três remineralizadores, que apresentaram diferença entre si. O maior valor de CE, de  $27,87 \mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ , foi observado para o fonolito, sendo seguido pelo fonolito hidro., com  $19,81 \mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$  e, por último, o siltito com  $14,14 \mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ .

**Tabela 17.** Valores de pH e condutividade elétrica dos diferentes remineralizadores em água destilada

Tempo	Água			Condutividade ( $\mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )		
	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.
1	5,61 b	5,79 a	5,83 a	23,20 a	18,18 b	13,54 c
3	5,52 b	5,69 a	5,78 a	26,25 a	21,36 b	14,37 c
5	5,63 b	5,76 a	5,86 a	26,77 a	18,53 b	12,20 c
8	5,60 b	5,40 b	5,81 a	28,47 a	19,46 b	15,34 c
16	5,66 b	5,74 b	5,89 a	34,67 a	21,53 b	15,26 c
Total	5,60 c	5,73 b	5,84 a	27,87 a	19,81 b	14,14 c
CV%		1,54			13,28	

Médias seguidas por letras iguais minúsculas na linha não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste Scott-Knott

Na Tabela 18, estão apresentados os teores de nutrientes solubilizados em água destilada. Para potássio, não houve diferença significativa entre o fonolito e o fonolito hidro., mas o siltito gla. destacou-se com o valor de  $14,16 \text{ mg K}_2\text{O.L}^{-1}$ . Para cálcio, não houve diferença significativa entre o fonolito hidro e o siltito gla., sendo o maior teor no fonolito. O caso do magnésio foi semelhante ao caso do potássio, com o siltito gla. com o maior teor. Em relação ao fósforo, os três remineralizadores foram diferentes entre si, com o siltito gla. apresentando o maior teor, em segundo lugar o fonolito hidro. e, por último, o fonolito.

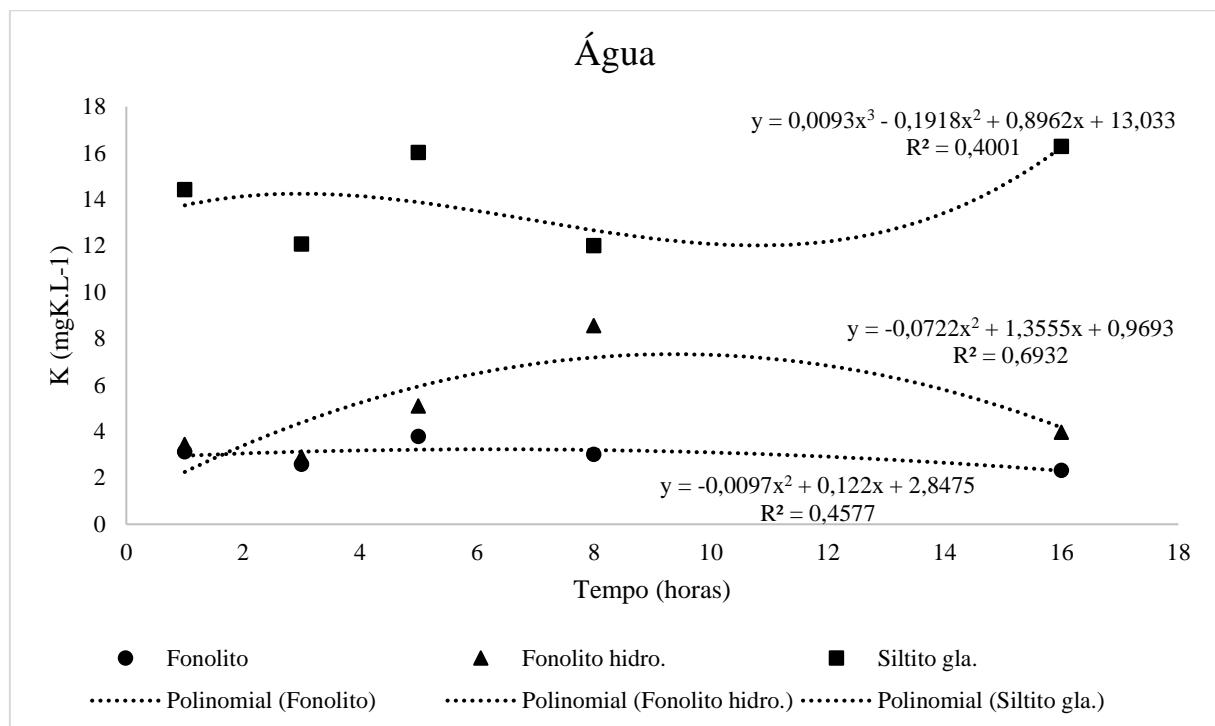
**Tabela 18.** Teores de potássio, cálcio, magnésio e fósforo solubilizados em água destilada nos diferentes remineralizadores

Água						
	K ( $\text{mg.L}^{-1}$ )			Ca ( $\text{mg.L}^{-1}$ )		
Tempo	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.
1	3,12 b	3,44 b	14,42 a	0,30 a	0,13 a	0,05 a
3	2,58 b	2,90 b	12,07 a	0,64 a	0,42 a	0,08 b
5	3,78 b	5,09 b	16,02 a	1,02 a	0,22 b	0,14 b
8	3,01 b	8,55 a	12,00 a	0,85 a	0,35 b	0,12 b
16	2,32 b	3,96 b	16,28 a	1,05 a	0,14 b	0,18 b
Total	2,96 b	4,79 b	14,16 a	0,77 a	0,25 b	0,11 b
CV%	45,26			67,43		
	Mg ( $\text{mg.L}^{-1}$ )			P ( $\text{mg.L}^{-1}$ )		
Tempo	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.
1	0,04 a	0,02 a	0,97 a	0,08 b	0,23 b	0,78 a
3	0,08 a	0,08 a	0,59 a	0,05 b	0,15 b	0,52 a
5	0,07 b	0,04 b	1,19 a	0,09 b	0,37 b	0,98 a
8	0,08 a	0,09 a	1,03 a	0,06 b	0,64 a	0,80 a
16	0,14 b	0,03 b	3,03 a	0,03 b	0,27 b	1,24 a
Total	0,08 b	0,05 b	1,36 a	0,06 c	0,33 b	0,87 a
CV%	157,99			51,84		

Médias seguidas por letras iguais minúsculas na linha não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste Scott-Knott

A Figura 14 apresenta o gráfico da solubilização de potássio dos três remineralizadores em água. O valor máximo, para o siltito gla., é em 2,97 horas, com solubilização de  $14,25 \text{ mgK}_2\text{O.L}^{-1}$ . O valor máximo calculado para o fonolito hidro. é 9,39 horas, com solubilização de  $7,30 \text{ mg K}_2\text{O.L}^{-1}$ . Para o fonolito, é em 6,28 horas, com solubilização de  $3,23 \text{ mgK}_2\text{O.L}^{-1}$ .

**Figura 14.** Gráfico da solubilização do potássio dos diferentes remineralizadores em água destilada



Considerando os valores de referência para o ácido acético de pH a 3,24 e condutividade a 412 uS.m<sup>-1</sup>, é possível verificar que o fonolito, a partir de três horas de agitação, conseguiu aumentar o pH e a condutividade elétrica, ao contrário do fonolito hidrotermalizado e do siltito glauconítico, que não influenciaram nenhum dos dois parâmetros. Em relação ao tempo de agitação, o fonolito influenciou no pH, tendo diferença significativa de 1 hora para 3 horas. Após as três horas, não houve diferença. Apesar de mais sutil, houve diferença significativa a partir das cinco horas de agitação para o fonolito hidrotermalizado. Após esse período, não foi observada diferença significativa. No fonolito, a condutividade elétrica foi aumentando linearmente, conforme o tempo de agitação (Tabela 19).

**Tabela 19.** Valores de pH e condutividade elétrica dos diferentes remineralizadores em ácido acético.

Tempo (h)	Ácido Acético			Condutividade ( $\mu\text{Sm}^{-1}$ )		
	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.
1	3,98 a	3,41 b	3,42 b	732,0 a	377,25 b	370,0 b
3	4,08 a	3,44 b	3,45 b	818,75 a	371,50 b	370,50 b
5	4,12 a	3,47 b	3,47 b	928,50 a	376,25 b	368,75 b
8	4,06 a	3,49 b	3,48 b	908,50 a	375,25 b	376,25 b
16	4,1 a	3,48 b	3,45 b	983,75 a	375,25 b	363,50 b
Total	4,07 a	3,46 b	3,45 b	874,30 a	375,10 b	369,80 b
CV%		0,95			5,24	

Médias seguidas por letras iguais minúsculas na linha não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste Scott-Knott

A Tabela 20 apresenta os teores de nutrientes solubilizados em ácido acético. Em relação ao potássio, observa-se que o fonolito se destacou com a maior solubilização. Com exceção do fósforo, o fonolito foi influenciado pelo tempo na solubilização de todos os nutrientes avaliados. Conforme o tempo aumentou, houve uma tendência de aumento da solubilização. Em relação ao cálcio, o fonolito também se destacou com a maior solubilização, seguido pelo fonolito hidro. e pelo siltito gla., que teve o menor valor. Em relação ao magnésio, não houve diferença significativa entre o fonolito e o fonolito hidro., e o siltito gla. apresentou os valores mais altos. Para o fósforo, o fonolito foi o que teve os valores mais baixos e, para os outros dois remineralizadores, não houve diferença significativa entre eles.

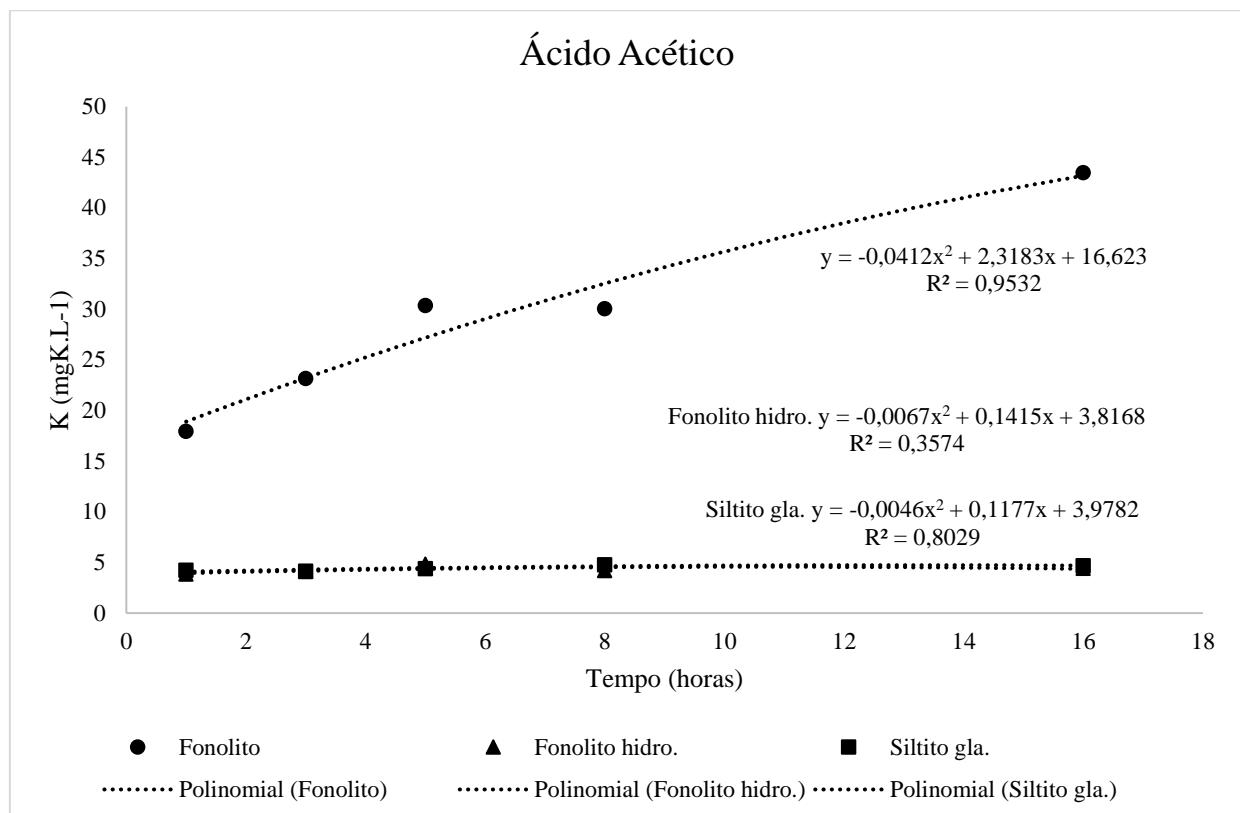
**Tabela 20.** Teores de potássio, cálcio, magnésio e fósforo solubilizados em ácido acético nos diferentes remineralizadores

Ácido Acético						
	K ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )			Ca ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		
Tempo (h)	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.
1	17,94 a	3,85 b	4,21 b	30,50 a	17,64 b	11,85 b
3	23,14 a	4,11 b	4,13 b	33,74 a	19,20 b	12,55 c
5	30,37 a	4,82 b	4,39 b	44,88 a	22,95 b	14,83 c
8	30,06 a	4,19 b	4,75 b	38,25 a	21,21 b	14,18 c
16	43,48 a	4,41 b	4,67 b	44,43 a	24,99 b	15,50 c
Total	28,99 a	4,27 b	4,43 b	38,36 a	21,20 b	13,78 c
CV%	10,16			17,46		
	Mg ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )			P ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		
Tempo (h)	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.
1	2,40 a	2,25 a	2,67 a	0,10 c	2,34 a	1,55 b
3	2,38 a	2,40 a	2,57 a	0,077 b	2,40 a	2,36 a
5	2,81 a	2,54 a	2,86 a	0,062 b	3,13 a	2,66 a
8	2,40 a	2,35 a	2,70 a	0,095 b	2,48 a	3,06 a
16	2,76 a	2,58 a	2,93 a	0,14 b	2,73 a	3,16 a
Total	2,55 b	2,42 b	2,75 a	0,094 b	2,62 a	2,56 a
CV%	9,72			27,43		

Médias seguidas por letras iguais minúsculas na linha não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste Scott-Knott

Na Figura 15, está representado o gráfico da solubilização de K dos diferentes remineralizadores em ácido acético. Apenas o fonolito foi influenciado pelo tempo de agitação, apresentando diferença significativa, e o máximo calculado sendo de 28,12 horas de agitação, com valor máximo de solubilização de  $49,19 \text{ mgK}_2\text{O} \cdot \text{L}^{-1}$ , que representa 0,49% de solubilização total da rocha e 6,15% de solubilização do  $\text{K}_2\text{O}$  presente na rocha.

**Figura 15.** Gráfico da solubilização do potássio dos diferentes remineralizadores em ácido acético



O ácido lático apresenta, como referência, pH de 2,48 e condutividade elétrica de 2180  $\mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ . Na Tabela 21, temos os valores de pH e condutividade elétrica dos diferentes remineralizadores em ácido lático. Apenas o fonolito foi capaz de mudar o pH do ácido, elevando-o um pouco. Quanto à condutividade elétrica, nem o fonolito hidrotermalizado nem o siltito glauconítico conseguiram causar modificação em relação ao padrão, ficando o valor em torno de 2000  $\mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ . Apenas o fonolito conseguiu alterar estes valores para condutividades elétricas menores. O tempo influenciou a mudança de pH e a condutividade do fonolito. A partir das três horas, não teve mais diferença significativa no pH. Na condutividade, isto foi observado a partir das oito horas.

**Tabela 21.** Valores de pH e condutividade elétrica dos diferentes remineralizadores em ácido lático.

Ácido lático				Condutividade ( $\mu\text{S.m}^{-1}$ )		
Tempo	pH	Fonolito hidro.	Siltito gla.	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.
1	2,97 a	2,47 b	2,51 b	1676,25 b	1938,25 a	1959,75 a
3	3,11 a	2,47 b	2,47 b	1876,0 c	1984,25 b	2060,0 a
5	3,11 a	2,49 b	2,50 b	1831,50 c	1927,50 b	1999,50 a
8	3,10 a	2,51 b	2,51 b	1922,25 a	2009,0 b	2112,50 a
16	3,15 a	2,52 b	2,51 b	1902,25 b	1897,0 b	2042,50 a
Total	3,09 a	2,49 b	2,50 b	1841,65 c	1951,20 b	2034,85 a
CV%		1,15			2,06	

Médias seguidas por letras iguais minúsculas na linha não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste Scott-Knott

Na Tabela 22, em relação aos teores de potássio, podemos observar que o fonolito se destacou, com  $80,64 \text{ mgK.L}^{-1}$ , após 16 horas de agitação. O fonolito hidro. e o siltito gla. não apresentaram diferença estatística entre eles, obtendo uma solubilização de em média  $4,3 \text{ mgK.L}^{-1}$ . Analisando o cálcio, o fonolito e o fonolito hidro não apresentaram diferença entre si, com valores médios de  $33,5 \text{ mgCa.L}^{-1}$ , obtendo os maiores valores, enquanto que o siltito gla. teve diferença estatística com uma média de  $15,55 \text{ mgCa.L}^{-1}$ . O magnésio apresentou diferentes solubilidades para os três remineralizadores, com o maior valor sendo observado no fonolito hidro., seguido do siltito gla. e, com o menor valor, no fonolito. Sobre a solubilidade do fósforo, o fonolito hidro. apresentou os maiores valores, seguido do siltito gla. e, por último, o fonolito.

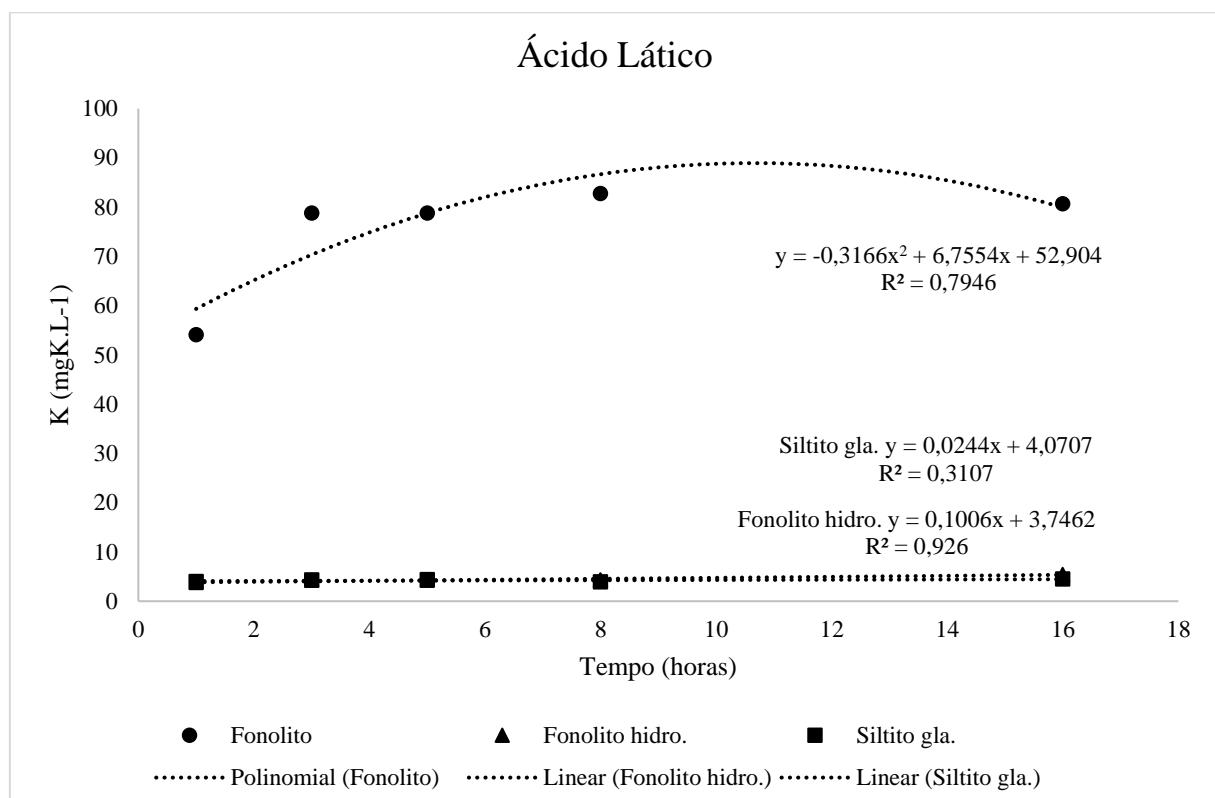
**Tabela 22.** Teores de potássio, cálcio, magnésio e fósforo solubilizados em ácido lático nos diferentes remineralizadores

Ácido Lático						
	K ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )			Ca ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		
Tempo	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.
1	57,12 a	3,82 b	3,98 b	27,90 a	20,26 b	14,92 c
3	78,75 a	4,23 b	4,33 b	32,35 a	30,94 a	16,87 b
5	78,76 a	4,26 b	4,36 b	33,65 a	34,22 a	17,15 b
8	82,77 a	4,29 b	3,95 b	34,20 a	33,75 a	14,77 b
16	80,64 a	5,45 b	4,54 b	41,47 b	48,65 a	14,06 c
Total	75,61 a	4,41 b	4,23 b	33,92 a	33,57 a	15,55 b
CV%	15,19			10,11		
	Mg ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )			P ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		
Tempo	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.
1	2,62 a	2,74 a	2,87 a	1,05 c	3,18 a	2,55 b
3	2,85 a	3,09 a	3,20 a	1,70 c	4,03 a	3,53 b
5	2,69 b	3,05 a	3,29 a	1,54 c	3,79 a	3,31 b
8	2,65 b	3,16 a	2,76 b	1,80 c	3,85 a	3,37 b
16	3,10 b	3,91 a	2,86 b	1,97 b	3,61 a	3,42 a
Total	2,78 c	3,19 a	3,00 b	1,61 c	3,69 a	3,24 b
CV%	8,35			9,2		

Médias seguidas por letras iguais minúsculas na linha não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste Scott-Knott

A Figura 16 apresenta o gráfico da solubilização do potássio dos diferentes remineralizadores em ácido lático, onde o máximo calculado de solubilização do fonolito é em 10,67 horas, com solubilidade de  $88,96 \text{ mgK.L}^{-1}$ , o que representa uma solubilidade de 0,89% da rocha e de 11,12 % de solubilidade de K total presente no fonolito. O tempo influenciou significativamente na solubilização apenas do fonolito.

**Figura 16.** Gráfico da solubilização do potássio dos diferentes remineralizadores em ácido lático



Na Tabela 23, é possível verificar os valores de pH e CE nos diferentes remineralizadores sob a influência do ácido cítrico. Como referência, o ácido cítrico apresenta pH de 2,49 e CE de 2.530 uS.m<sup>-1</sup>. O fonolito, dentre os três remineralizadores, foi o que apresentou poder de elevar o pH, ao contrário dos outros dois, que mantiveram o pH quase sem alteração ao longo do tempo de agitação. Relativamente à condutividade elétrica, o fonolito teve diferença significativa, na comparação com os demais, diminuindo o valor da CE referente ao ácido cítrico puro. Apesar de haver diferença significa entre o fonolito hidro e o siltito gla., a diminuição, em relação ao padrão, foi mais visível no fonolito.

**Tabela 23.** Valores de pH e condutividade elétrica dos diferentes remineralizadores em ácido cítrico

Ácido Cítrico						
Tempo	pH			Condutividade ( $\mu\text{S.m}^{-1}$ )		
	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.
1	2,86 a	2,52 b	2,53 b	1820,50 b	2400,0 a	2422,50 a
3	2,90 a	2,46 c	2,50 b	1822,0 b	2242,50 a	2272,50 a
5	2,93 a	2,50 b	2,50 b	1882,75 c	2322,50 a	2255,0 b
8	2,97 a	2,54 c	2,59 b	1936,50 b	2310,0 a	2352,50 a
16	2,89 a	2,49 b	2,49 b	1976,25 c	2272,50 b	2385,0 a
Total	2,91 a	2,50 c	2,52 b	1887,60 c	2309,50 b	2337,50 a
CV%	0,75			1,67		

Médias seguidas por letras iguais minúsculas na linha não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste Scott-Knott

Na Tabela 24, são apresentados os teores de nutrientes solubilizados em ácido cítrico. O fonolito, à semelhança dos ácidos acético e lático, apresentou a maior solubilização de potássio e o fonolito hidro. e o siltito gla. não tiverem diferença entre si. Para cálcio, o fonolito também se destacou, sendo seguido pelo fonolito hidro. e, com o menor teor, o siltito gla. Em relação ao magnésio, o fonolito e o fonolito hidro. não apresentaram diferença significativa entre si e houve destaque para o siltito gla, que teve o maior valor. No caso do fósforo, não houve diferença entre os três remineralizadores.

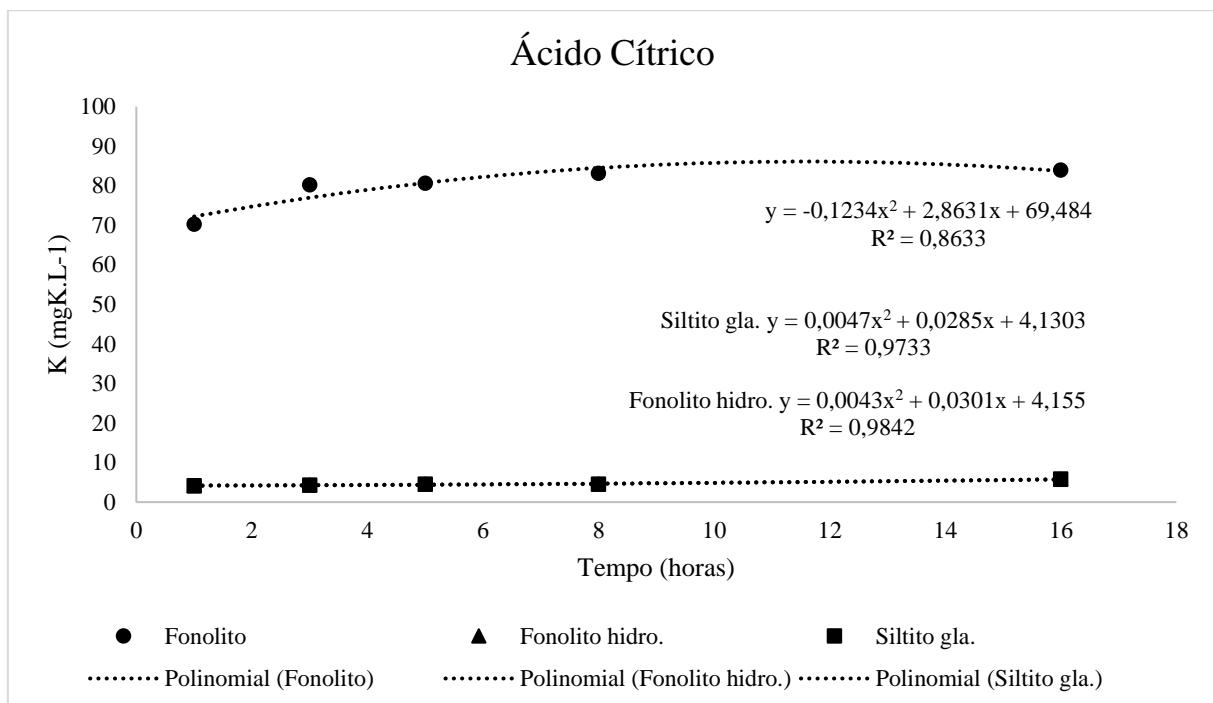
**Tabela 24.** Teores de potássio, cálcio, magnésio e fósforo solubilizados em ácido cítrico nos diferentes remineralizadores

Ácido Cítrico						
Tempo	K ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )			Ca ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		
	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.
1	70,26 a	4,13 b	4,11 b	23,85 a	17,81 b	10,16 c
3	80,20 a	4,33 b	4,26 b	23,36 a	18,28 b	12,99 c
5	80,59 a	4,51 b	4,56 b	26,32 a	20,88 b	14,25 c
8	83,09 a	4,57 b	4,53 b	26,58 a	19,39 b	14,93 c
16	83,97 a	5,73 b	5,82 b	34,16 a	24,21 b	15,56 c
Total	79,62 a	4,65 b	4,66 b	26,85 a	20,11 b	13,58 c
CV%	7,48			6,1		
Tempo	Mg ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )			P ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		
	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.	Fonolito	Fonolito hidro.	Siltito gla.
1	2,56 a	2,62 a	2,69 a	0,04 a	0,015 a	0,015 a
3	2,89 a	2,67 a	3,05 a	0,030 a	0,020 a	0,027 a
5	3,02 a	2,85 a	3,12 a	0,027 b	0,057 a	0,022 b
8	2,99 b	2,76 b	3,30 a	0,020 a	0,032 a	0,020 a
16	3,28 b	3,71 a	3,48 b	0,025 a	0,047 a	0,025 a
Total	2,95 b	2,92 b	3,13 a	0,028 a	0,034 a	0,023 a
CV%	7			62,73		

Médias seguidas por letras iguais minúsculas na linha não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste Scott-Knott

Na Figura 17, é apresentado o gráfico de solubilização do potássio dos três remineralizadores em ácido cítrico. O fonolito tem como máximo, calculado em 11,62 horas, o valor de  $86,09 \text{ mg K.L}^{-1}$ , apresentando 0,86 % de  $\text{K}_2\text{O}$  solubilizado, que corresponde a 10,76% de  $\text{K}_2\text{O}$  do total solubilizado presente na rocha, o que é diferente do que consta no rótulo do produto, que garante o mínimo de 1% de  $\text{K}_2\text{O}$  solubilizado em ácido cítrico em concentração de 2%.

**Figura 17.** Gráfico da solubilização do potássio dos diferentes remineralizadores em ácido cítrico



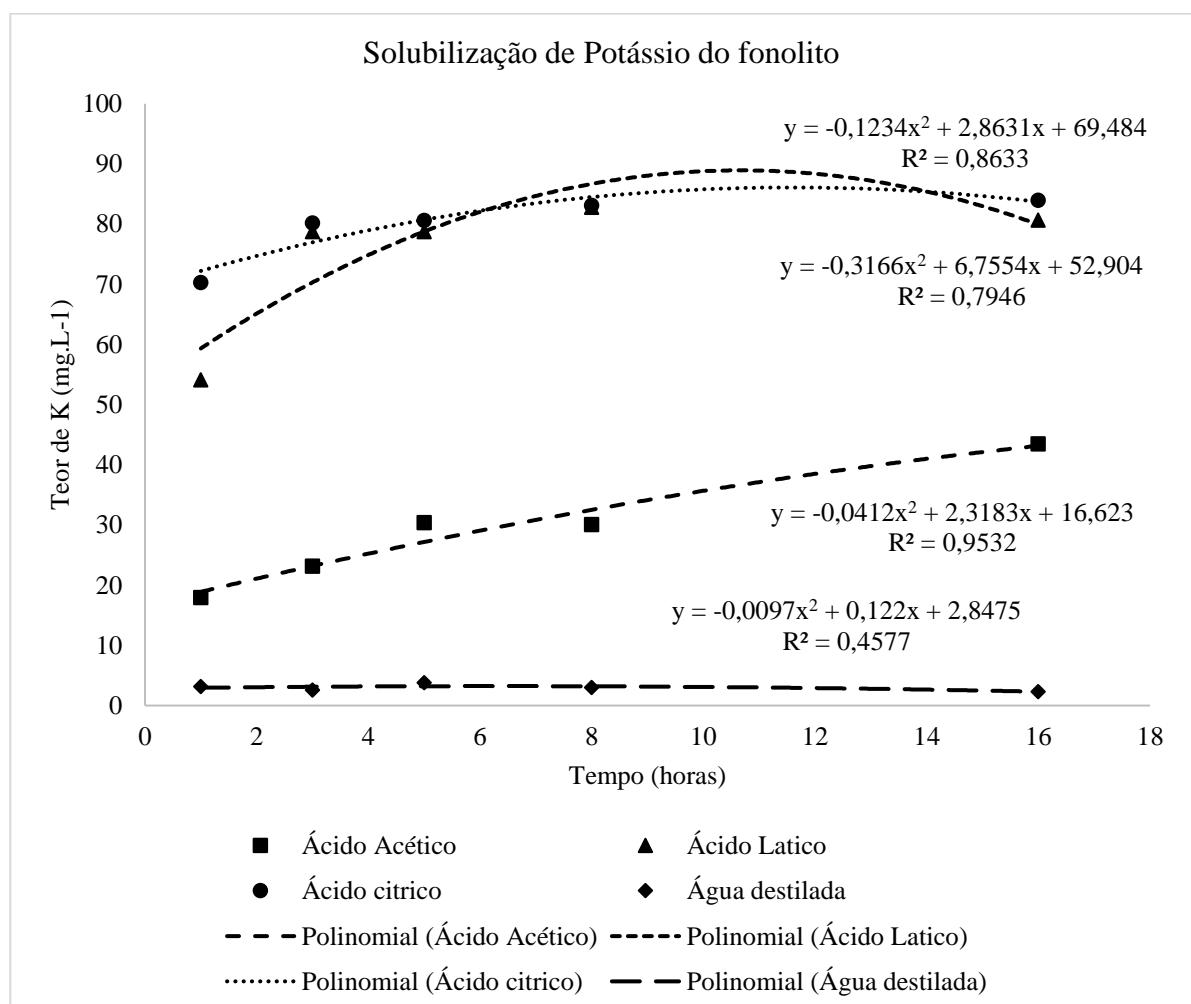
Os resultados corroboram com o encontrado na literatura. Utilizando a solução extratora de ácido cítrico 2%, Lodi (2018) extraiu 10,1% do K contido em uma rocha feldspática. Ribeiro (2018) avaliou várias rochas silicáticas, com diferentes teores de K, e constatou que o ácido cítrico 2% apresentou maior eficiência na extração de K, chegando a 16,7% do K contido na rocha.

Existe uma grande correlação entre o potássio absorvido pelas plantas e o potássio extraído com ácido cítrico 2% (SOUZA et al. 2023). Isso vai de acordo com as diretrizes do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento que preconiza a utilização de extrator à base de ácido cítrico 2% como método padrão para determinação do potássio disponível (Brasil, 2014).

No gráfico da Figura 18, observa-se a relação da solubilização de potássio do fonolito com as diferentes soluções. O teor de K extraído por ácido cítrico foi muito maior do que o obtido pelo ácido acético e pela água, chegando a ser 36 vezes maior em relação à água e duas vezes maior em relação ao ácido acético, considerando o maior tempo de agitação (16h), possivelmente em função da maior capacidade acídica e complexante do ácido cítrico. O ácido láctico teve teores similares ao ácido cítrico e o mesmo comportamento de solubilização de K. Ácidos orgânicos, tais como o oxálico, cítrico, tartárico e acético, são comumente encontrados

nos solos e muitos deles também são utilizados como solventes para estudos de dissolução de minerais silicatados e rochas em condições laboratoriais (Song e Huang, 1988; Priyono e Gilkes, 2008). Huang e Kiang (1972) encontraram que os ácidos acético e cítrico ( $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$ ) foram, respectivamente, o mais fraco e o mais forte na dissolução de elementos metálicos de minerais silicáticos.

**Figura 18.** Solubilização de potássio no fonolito com as soluções de ácido cítrico, lático, acético e com água destilada



O fonolito hidrotermalizado e o siltito glauconítico não apresentaram aumento de solubilização de K com os ácidos utilizados, dando a entender que estes dois remineralizadores não são tão eficazes na disponibilização de K para as plantas. O siltito obteve a melhor solubilização em água, com  $14,25 \text{ mgK}_2\text{O.L}^{-1}$ , correspondendo apenas a 0,16% de  $\text{K}_2\text{O}$  solubilizado da rocha e 1,42% do potássio total contido na rocha. A solubilização de K pelo fonolito hidrotermalizado não foi muito diferente nos quatro tratamentos, ficando com uma de

média de  $4,53 \text{ mgK}_2\text{O.L}^{-1}$ , que corresponde a 0,045% de  $\text{K}_2\text{O}$  total e a 0,38% do  $\text{K}_2\text{O}$  presente na rocha.

**Tabela 25.** Soma de bases e  $\text{K}_2\text{O}$  dos diferentes remineralizadores em ácido cítrico e em água destilada com suas respectivas porcentagens

<b>Ácido cítrico</b>				
	<b>Soma das bases <math>\text{K}_2\text{O}</math>, <math>\text{CaO}</math> e <math>\text{MgO}</math></b>		<b><math>\text{K}_2\text{O}</math></b>	
	$\text{mg.L}^{-1}$	%	$\text{mg.L}^{-1}$	%
Fonolito	121,41	1,2141	83,97	0,8397
Fonolito hidro.	33,65	0,3365	5,73	0,0573
Siltito gla.	24,86	0,2486	5,82	0,0582

<b>Água destilada</b>				
	<b>Soma de base <math>\text{K}_2\text{O}</math> <math>\text{CaO}</math> e <math>\text{MgO}</math></b>		<b><math>\text{K}_2\text{O}</math></b>	
	$\text{mg.L}^{-1}$	%	$\text{mg.L}^{-1}$	%
Fonolito	3,51	0,0351	2,32	0,0232
Fonolito hidro.	4,13	0,0413	3,96	0,0396
Siltito gla.	19,49	0,1949	16,28	0,1628

Segundo a IN-5 do MAPA, os remineralizadores devem apresentar as seguintes especificações e garantias mínimas: em relação à soma de bases ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), deve ser igual ou superior a 9% (nove por cento) em peso/peso; em relação ao teor de óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), deve ser igual ou superior a 1% (um por cento) em peso/peso. De acordo com as especificações da rotulagem do produto, os remineralizadores estão de acordo. No entanto, observada a solubilização, nenhum dos remineralizadores se adequaria às exigências. Ressalta-se que a IN-5 não especifica valor mínimo de solubilização de nutriente de uma rocha, (Resende et al., 2012). No entanto, pode ser relevante mudar essas garantias mínimas para um padrão de solubilidade em ácido cítrico, pois este é o mecanismo equiparado às reações bioquímicas do solo, microrganismos e rizosfera, sendo o método laboratorial confiável mais próximo da solubilização e disponibilidade de nutrientes possível.

#### 4.4.3. CONCLUSÕES

O ácido cítrico e o ácido lático foram as soluções extratoras que mais solubilizaram potássio no fonolito. O fonolito apresentou maior solubilização de potássio com  $83,97 \text{ mg K}_2\text{O.L}^{-1}$ , que corresponde a 0,83% de solubilização, contrastando com a solubilidade em água de  $2,32 \text{ mg K}_2\text{O.L}^{-1}$ , que corresponde a 0,023%. O fonolito hidrotermalizado e o siltito glauconítico não tiveram eficiência de extração de nutrientes em nenhuma das soluções

utilizadas, com  $5,73 \text{ mg K}_2\text{O.L}^{-1}$  (0,057%) e  $5,82 \text{ mg K}_2\text{O.L}^{-1}$  (0,058%) de solubilização em ácido cítrico, respectivamente. Em água, obtiveram  $3,96 \text{ mg K}_2\text{O.L}^{-1}$  (0,039%) e  $16,28 \text{ mg K}_2\text{O.L}^{-1}$  (0,16%). As soluções de ácido cítrico e ácido lático a 2% são promissoras para quantificar os nutrientes disponíveis.

## 5.CONCLUSÕES GERAIS

A adubação com  $\text{K}_2\text{SO}_4$  incrementou a produtividade do milho em cerca de 12% em relação ao tratamento controle absoluto. Referente aos remineralizadores estudados, quanto à produtividade do milho, o fonolito apresentou resultados mais promissores do que o fonolito hidrotermalizado e o siltito glauconítico. Os remineralizadores não foram eficientes para substituição total do suprimento de K na cultura do milho. Entretanto, o uso da adubação mista (remineralizador + sulfato de potássio) é uma prática viável, o que indica que os remineralizadores têm potencial de substituição de parte das fontes convencionais de K por meio da utilização de rochas brasileiras e de diminuição da dependência de uso de fertilizantes solúveis.

O ácido cítrico e o ácido lático foram as soluções extratoras que mais solubilizaram os nutrientes no fonolito. O fonolito teve o maior potencial de solubilização de nutrientes. O fonolito hidrotermalizado e o siltito glauconítico não tiveram eficiência de extração de nutrientes com nenhuma das soluções testadas. Quanto maior o tempo de contato das rochas com as soluções, maior a quantidade K solubilizado. As soluções de ácido cítrico e ácido lático a 2% são promissoras para quantificar os nutrientes disponíveis.

## 6.CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adubação orgânica utilizada nos sistemas orgânicos e agroecológicos de produção é variada. Os produtos mais utilizados são: estercos, o composto (produzido a partir de materiais de origem animal e/ou vegetal com ou sem fermentação), biofertilizantes, vermicomposto e adubação verde. Para além de fertilizar o solo, a adubação orgânica também melhora os aspectos químicos, físicos e biológicos, devido à quantidade elevada de matéria orgânica presente na sua composição. Devido a estas características da adubação orgânica, cada fonte de adubação utilizada vai disponibilizar para as plantas diferentes nutrientes, nunca estes separadamente. Com base nisso, os remineralizados são uma proposta de suplementação da adubação e, com esse propósito, são viáveis. No entanto, é preciso investigar melhor a respeito

dos remineralizados registrados no MAPA. No trabalho realizado com três remineralizadores registrados no Ministério, o siltito glauconítico não apresentou nenhuma eficiência em relação à adubação potássica.

É possível afirmar que os remineralizadores fonolito e fonolito hidrotermalizado apresentam eficiência agronômica em adubação conjugada, podendo então substituir parte da adubação potássica utilizada (50%), levando ainda o benefício de adubação com outros macro e micro nutrientes presentes na sua composição e seu caráter básico. Estes remineralizadores, ao atuar como adubação completar, ajudam a diminuir a dependência externa por fertilizantes potássicos, assim como diminuem os custos de produção e posicionam um passivo ambiental em uma utilidade nobre e eficiente, tanto em nível de problema como ambientalmente.

Foram encontrados alguns problemas quando os remineralizadores foram usados para substituir por completo a adubação potássica. Primeiro, observou-se que a lenta solubilização deles tem que ser levada em conta e que as doses calculadas devem ser baseadas na solubilização destes em ácido cítrico, o que pode acarretar o segundo problema, que seria relacionado com a quantidade elevada de remineralizador que se teria que aplicar, aumentando, assim, de modo considerável, os custos de produção em prejuízo da viabilidade econômica do processo. Outro problema se refere às garantias mínimas de solubilização que devem ser discutidas e deveriam ser inseridas na legislação.

Como sugestão para futuros estudos, indica-se a avaliação econômica e agronômica de processos que podem ser utilizados para aumentar a solubilidade dos remineralizadores, como, por exemplo, no caso da exploração do processo de acidificação.

## **7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ACEMAN, S. Simulated organic acid weathering of granodiorite and basalt. Msc Thesis, University of British Columbia, 22p. 1989.

ALCANTARA, Karina Fernandes de. A origem do milho na américa latina, história, mitos e seu uso no México e no Brasil. Monografia apresentada ao Curso de Gastronomia do Departamento da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza 2019.

ALMEIDA, D. L.; RIBEIRO, R.; GUERRA, J. G. M. Sistema integrado de produção agroecológica: uma experiência de pesquisa em agricultura orgânica. 2003.

ALVES, Vera Maria Carvalho et al. Solubilização de potássio presente em minerais por microrganismos e efeitos no desenvolvimento de culturas agrícolas. **Embrapa Milho e Sorgo-Documents (INFOTECA-E)**, 2021. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1134272>

ANDRADE, P. M. et al. Effect of phonolite addition on sintering kaolinitic clay. Cerâmica, v. 51, n. 320, p. 361–370, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132005000400010>.

BACHA, André Luis Reis et al. Geoquímica de piroclastos intemperizados da Caldeira Vulcânica de Poços de Caldas, Minas Gerais. Geologia USP. Série Científica, v. 20, n. 3, p. 63-80, 2020.

BIN, L; BIN, W; MU, P; LIU, C; TENG, H. H. 2010. Microbial release of potassium from Kbearing minerals by thermophilic fungus Aspergillus fumigatus. Geochim Cosmochim Acta, 72:87–98.

BLOOM, P. R.; NATER, E. A. Kinetics of dissolution of oxide and primary silicate minerals. In: SPARKS, D. L.; SUAREZ, D. L. (Eds.). Rates of Soil Chemical Processes. Soil Science Society of America, 1991. p. 151–189.

BOLDRIN, Karina Volpi Furtini et al. Alternative sources of potassium in the growth of calla lily. *Scientia Horticulturae*, v. 255, p. 96-102, 2019.

BOLDRIN, Paulo Fernandes et al. Fontes alternativas de potássio para o cultivo do milho. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 43, p. e023619, 2020.

BRASIL, Lei Nº12.890, de 10 de dezembro de 2013. Altera a Lei nº6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), Instrução Normativa Nº5, de 10 de março de 2016

CICERI, Davide et al. Fertilizing properties of potassium feldspar altered hydrothermally. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 50, n. 4, p. 482-491, 2019. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1566922>

CHIEZA, E. D.; GUERRA, J. G. M.; ARAÚJO, E. da. S.; ESPINDOLA, J. A. A.; FERNANDES, R. C. Produção e aspectos econômicos de milho consorciado com Crotalária juncea L. em diferentes intervalos de semeadura, sob manejo orgânico. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 64, n.2, p. 189-196, mar/abr, 2017.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento, Safra Brasileira de Grãos, disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>, Acessado em 20/08/2024.

CORTES, G. P. et al. Fonolito como substituto do cloreto de potássio e/ou outras fontes de potássio na agricultura e pecuária no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 1., 2010, Brasília. Anais... Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2010. p. 75-83.

CRUZ, José Carlos; KARAM, Décio; MONTEIRO, Márcio A. R.; MAGALHÃES, Paulo César, A cultura do milho, Embrapa milho e sorgo, 2008.

DETTMER, Carlos Alberto et al. Agricultura e inovação: estudo sobre a viabilidade de uso do “remineralizador” em sistemas de produção agrícola. Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN), v. 3, n. 1, 2019.

DIAS, Ricardo de Castro. Potencial e Eficiência da Utilização de Rochas Silicáticas como Fonte de Potássio na Agricultura. Tese de Doutorado. UFRRJ Instituto de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia Ciência do Solo. 2022.

FAGERIA, Nand Kumar.; ARAÚJO, Adelson Paulo; STONE, Luís Fernando. Química e Mineralogia do Solo – Parte II Aplicações. Capítulo XIV – Mudanças Químicas na Rizosfera. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 161-176. 2009.

Ficha técnica yoorin, produto potasil. Disponível em:  
<https://www.yoorin.com.br/pt/produtos/potasil>, acesso em 02 de dezembro de 2022.

FREIRE, L. R., et al. Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro. 2013.

GOTT, Roney M. et al. Índices diagnósticos para interpretação de análise foliar do milho. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, p. 1110-1115, 2014.

HEDRICH, R. Ion channels in plants. Physiological Reviews, v. 92, n. 4, p. 1777-1811, 2012.  
DOI: 10.1152/physrev.00038.2011.

HUANG, W. H. e KIANG, W. C. Laboratory dissolution of plagioclase feldspars in water and organic acids at room temperature. American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials, v. 57, n. 11-12, p. 1849-1859, 1972.

JONES, David.L. Organic Acids in the Rhizosphere – A Critical Review. Plant and Soil, vol. 205, no. 1, 1998, pp. 25–44. JSTOR, Disponível em <http://www.jstor.org/stable/42949904>. Acesso em 27 de agosto de 2023.

LAPIDO-LOUREIRO, Francisco Eduardo; NASCIMENTO, Marisa; MONTE, Marisa Bezerra de Mello. Agrominerais-potássio. CETEM/MCTI, 2008.

LEMOS, Vinícius Teixeira et al, Efeito da aplicação de ácido cítrico nos atributos químicos do solo e na produtividade do cafeiro em duas regiões distintas de Minas Gerais, VII Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, Araxá – MG, 2011.

LEONARDOS, Othon H.; THEODORO, Suzi H.; ASSAD, M. L. Remineralization for sustainable agriculture: A tropical perspective from a Brazilian viewpoint. Nutrient Cycling in Agroecosystems, v. 56, n. 1, p. 3-9, 2000.

LIAN, B; WANG, B; PAN, M; LIU, C; TENG, H. H. 2008. Microbial release of potassium from K bearing minerals by thermophilic fungus *Aspergillus fumigatus*. *Geochim Cosmochim Acta*, 72(1):87–98.

LOPES, A. S. Mineralogia do potássio em solos do Brasil. Simpósio sobre potássio na agricultura brasileira, p. 51-65, 1982.

LUZ, Pedro Henrique de Cerqueira et al. Avaliação do desempenho do fonolito via mineral e no enriquecimento da torta de filtro em soqueira de cana-de-açucar. II Congresso brasileiro de rochagem, 2013.

LUZ, Pedro Henrique de Cerqueira et al. Otimização da aplicação de corretivos agrícolas e fertilizantes. Informações Agronômicas, Piracicaba, v. 129, n. 1, p. 1-13, 2010.

MACHADO, Ramires Ventura et al. Characterization of ornamental rock residue and potassium liberation via organic acid application. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 40, 2016.

MAGALHÃES, Paulo César et al. Fisiologia do milho. Circular técnica, Embrapa 2002.

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Plano Nacional de fertilizantes. Publicado em 03 de maio 2022, disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/o-plano-nacional-de-fertilizantes>. Acesso em 02 de dezembro 2022.

MARTINS, Eder de Souza et al. Rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura/rochas e minerais industriais. Rio de Janeiro: CETEM, 2007.

MARTINS, Éder de Souza et al. Agrominerais-Rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. CETEM/MCTI, 2008.

MARTINS, Eder de Souza et al. Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B. da; CASTILHOS, Z. C. (Orgs.). Agrominerais para o Brasil. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. p. 89-104.

MASSAD, M. D.; OLIVEIRA, F. L. de; FÁVERO, C.; DUTRA, T. R.; & QUARESMA, M. A. L. (2017). Desempenho de milho verde em sucessão a adubação verde com crotalária, submetido a doses crescentes de esterco bovino, na caatinga mineira. MAGISTRA, 26(3), 322–332.

MEENA, V.S.; MAURYA, B.R.; VERMA, P. Does a rhizospheric microorganism enhance K<sup>+</sup> availability in agricultural soils? Microbiological Research, v. 169 p. 337347, 2014.

MEERT, Leandro et al. Produtividade e Rentabilidade da Soja cultivada com Fontes Alternativas de Nutrientes em Guarapuava-PR. Cadernos de Agroecologia [Volumes 1 (2006) a 12 (2017)], v. 4, n. 1, 2009.

MELO, V. de F.; CASTILHOS, R. M. V.; PINTO, L. F. S. Reserva mineral do solo. Química e mineralogia de solos; conceitos básicos. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 251-332, 2009.

Museu de rochas, Rochas ígneas, Universidade Federal do Pampa, disponível em: <https://sites.unipampa.edu.br/mvgp/rochas-museu/rochas-igneas/igneas-plutonicas/sientio/> acesso em 26 de março de 2023.

NOGUEIRA, A. R. A.; SOUZA, G. B. Manual de Laboratórios: Solo, Água, Nutrição Vegetal, Nutrição Animal e Alimentos. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. 313p.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. *Fertilidade do Solo*. 1 ed. Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

PAIVA JÚNIOR, M. C. de; PINHO, R. G. von; PINHO, E. V. R. von; RESENDE, S. G. de. Desempenho de cultivares para a produção de milho verde em diferentes épocas e densidades de semeadura em Lavras-MG. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 25, n. 5, p.1235-1247, set./out. 2001.

PEREIRA FILHO, I. A. P.; OLIVEIRA, A. C de; CRUZ, J. C. Milho verde: espaçamentos, densidades de plantas, cultivares e épocas de semeadura, influenciando rendimento e algumas características de espigas comercializáveis. *Congresso Nacional de Milho e Sorgo*, 22., 1998, Recife. Globalização e segurança alimentar: anais. Recife: IPA, 1998. CD-ROM

PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C.; GAMA, E. E. G. Cultivares de milho para o consumo verde. 2002.

PIZA, P. D. D. T.; FRANÇA, C. A.; BERTOLINO, L. C. 2009. Verdete do Cedro do Abaeté (MG) como fonte alternativa para potássio. In: XII Jornada de Iniciação Científica. Rio de Janeiro: CETEM. Anais. 7p

PRAJAPATI, K.; SHARMA, M.; MODI, H. 2012. Isolation of two potassium solubilizing fungi from ceramic industry soils. *Life Sci. Leaflets*. 5, 71-75.

PRIYONO, Joko e GILKES, Robert John. Dissolution kinetics of milled-silicate rock fertilizers in organic acid. *Journal of Tropical Soils*, v. 13, n. 1, p. 1-10, 2008.

RESENDE, A. V.; Machado, C. T. T.; Martins, E. S.; Nascimento, M. T.; Sobrinho, D. A. S.; Faleiro, A. S. G.; Linhares, N. W.; Souza, A. L. e Corazza, E. J. (2005). Potencial de rochas silicáticas no fornecimento de potássio para culturas anuais: I. Respostas da soja e do milheto.

In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 30. Recife, Anais. Recife: UFRPE/SBCS. (CD-rom).

RIBEIRO, Genicelli Mafra, Caracterização de remineralizadores silicáticas, avaliação da solubilidade em ácidos orgânicos e potencial de liberação de nutrientes como remineralizadores de solos agrícolas. Tese (doutorado), curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, 2018.

RIBEIRO, Luciano da Silva et al. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes do nutriente para as plantas solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, p. 891-897, 2010.  
RIBEIRO, Roberto Carlos et al. ASSOCIAÇÃO DA COMPOSTAGEM AO PROCESSO DE ROCHAGEM VISANDO A LIBERAÇÃO DE POTÁSSIO. In: **II Congresso Brasileiro de Rochagem**. p. 51.2013

SANTOS, D. S. Rochagem como alternativa para fornecimento de potássio para as culturas. 2013. 89 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2013.

SANTOS, Wedisson Oliveira et al. Production and evaluation of potassium fertilizers from silicate rock. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, v. 179, n. 4, p. 547-556, 2016. DOI: 10.1002/jpln.201500484

SATTAR, A.; NAVEEDA, M.; ALIA, M.; ZAHIRA, Z.; NADEEMB, S.; YASEENA, M.; MEENAC, V. S.; FAROOQD, M.; SINGHE, R.; RAHMANF, M.; MEENA, H. N. Perspectives of potassium solubilizing microbes in sustainable food production system: a review. Applied Soil Ecology, v. 133, p. 146-159, 2019. DOI: 10.1016/j.apsoil.2018.09.012.

Secretaria da Agricultura e Abastecimento. Prognóstico agropecuário. 2022. Disponível em: [https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos\\_restritos/files/documento/2022-02/VOL%2013%20N%2041%202021%20Progn%C3%B3stico%20Agropecu%C3%A1rio%20MILHO%20-.pdf](https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2022-02/VOL%2013%20N%2041%202021%20Progn%C3%B3stico%20Agropecu%C3%A1rio%20MILHO%20-.pdf)

SHENG, X.F.; He, L.Y. 2006. Solubilization of potassium-bearing minerals by a wild-type strain of *Bacillus edaphicus* and its mutants and increased potassium uptake by wheat. *Can. J. Microbiol.* 52, 66-72.

SILVA, Adriana de Aquino Soeiro da; MEDEIROS, Marta Eloísa; SAMPAIO, João Alves, & GARRIDO, Francisco Manuel dos Santos (2012). Caracterização do verdete de cedro do Abaeté para o desenvolvimento de um material com liberação controlada de potássio. *HOLOS*, 5, 42–51. <https://doi.org/10.15628/holos.2012.1093>

SILVA, Carla Cristina Alves da. Avaliação da liberação de potássio de rochas silicáticas por extrações seletivas. Universidade de Brasília – UnB Planaltina – FUP, Programa de pós-graduação em ciências ambientais, Brasília, DF, 2017.

SILVA, U. C. et al. Biossolubilização de potássio in vitro a partir da rocha fonolito por microrganismos do solo. **Embrapa Milho e Sorgo-Documentos (INFOTECA-E)**, 2015.

SONG, S. K. e HUANG, P. M. Dynamics of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids. *Soil Science Society of America Journal*, v. 52, n. 2, p. 383-390, 1988.

SOUZA, R. B.; ALCÂNTARA, F. A. Adubação no sistema orgânico de produção de hortaliças. Circular técnica, 65. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2008, 8p.

SOUZA, Fred Newton Da Silva; NETO, Claudioaldo Aguiar; ALVES, Juliana Mariano. AVALIAÇÃO DA SOLUBILIDADE DE UM REMINERALIZADOR E SEUS EFEITOS SOBRE A FERTILIDADE DO SOLO. *AGRI-ENVIRONMENTAL SCIENCES*, v. 9, n. 2, p. 8-8, 2023.

SOUZA, Fred Newton Silva et al. Efeitos condicionador e nutricional de um remineralizador de solos obtido de resíduos de mineração. *Agri-Environmental Sciences*, v. 3, n. 1, p. 1-14, 2017.

STRAATEN, Peter Van. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, p. 731-747, 2006.

TAVARES, Laene de Fátima et al. Nutrients release from powder phonolite mediated by bioweathering actions. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, v. 7, p. 89-98, 2018.

TEDROW, J. C. Greensand and greensand soils of New Jersey: a review. New Jersey: Rutgers Cooperative Extension, 2002. 40 p.

TOLEDO, Maria Cristina Motta de. Intemperismo e pedogênese. **Geologia**, São Paulo: USP/UNIVESP/EDUSP 2014.

TORQUETI, Sabrina Thereza dos Santos et al. Fonte alternativa de potássio no cultivo do girassol ornamental. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, p. 257-264, 2016.  
<http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542016403036115>

VASSILEV, N. et al. Microbial solubilization of rock phosphate on media containing agro-industrial wastes and effect of the resulting products on plant growth and P uptake. **Plant and Soil**, v. 287, n. 1, p. 77-84, 2006.

VIOLATTI, Isabel Cristina Acciardi. "Siltito glauconítico calcinado e não calcinado como fertilizantes para *Urochloa brizantha* cv. Marandú." (2018). Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do programa de pósgraduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração em Solos, para obtenção do título de “Mestre”

ZHAO, Xinlin et al. Can potassium silicate mineral products replace conventional potassium fertilizers in rice–wheat rotation?. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 4, p. 2075-2083, 2019.

ZÖRB, C.; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. 2014. Potassium in agriculture – status and perspectives. **Journal of Plant Physiology**. 171:656–69.

## 8.ANEXO I

### AVALIAÇÃO DE DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE ÁCIDO CÍTRICO NA SOLUBILIZAÇÃO E DISPONIBILIDADE DE K PARA O MILHETO

#### MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação da Embrapa Agrobiologia, no município de Seropédica, RJ, com a planta indicadora milheto (*Pennisetum glaucan*). O delineamento experimental é de blocos casualizados, com quatro doses de ácido cítrico (100, 200, 400 e 800 kg ha<sup>-1</sup>), o remineralizador fonolito com dose de 400kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>, um controle sem ácido e um controle com sulfato de potássio e quatro repetições. Foram utilizados vasos plásticos, com capacidade de 800 cm<sup>3</sup> e o milheto foi semeado em alta densidade. Foram analisadas a altura maior das plantas, o comprimento da raiz, a massa seca da parte aérea, a massa seca da raiz e o teor de nutrientes na parte aérea e no sistema radicular. A colheita do material foi realizada 35 dias após a semeadura, no dia 3 de agosto de 2024.

O solo utilizado nos vasos foi retirado de área experimental da Embrapa Agrobiologia, no Terraço. Na Tabela 26, abaixo, está a análise de solo realizada.

**Tabela 26.** Análise da terra utilizada como substrato para os vasos

Al	Ca	H+Al	Mg	K	P	pH	N	C
----- cmolc.dm <sup>-3</sup> -----								
0,0	0,64	1,62	0,23	18,45	5,43	5,69	0,029	0,511

Após sete dias do plantio, foi aplicada solução nutritiva para vasos de Leonard, segundo Norris (modificada), retirando-se o potássio e o ácido cítrico da solução, que contou, então, com a composição de CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O; MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O; CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O; ZnSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O; MnSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O; (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>.4H<sub>2</sub>O; H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> e FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O. Foram aplicados 50ml da solução por vaso.

A adubação fosfatada foi realizada com o termofosfato (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 17%) e foram adicionados 0,56 g por vaso

Para a determinação da biomassa seca, o material foi levado para a estufa de ventilação forçada, com temperatura de 65°C, até atingir massa constante. Após o processo de secagem, o material foi triturado em moinho de facas tipo Willey. As amostras foram separadas e levadas ao Laboratório de Química Agrícola da Embrapa Agrobiologia para determinação do teor de

macronutrientes, de acordo com os procedimentos descritos por Nogueira e Souza (2005). A análise estatística dos dados foi realizada no programa R 4.2.2 (R Core Team, 2022). Foi utilizada a análise de variância, as médias foram comparadas por meio do teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, e análises das doses foram feitas por regressão linear.

## 9.ANEXO II

### AVALIAÇÃO DE DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE ÁCIDO CÍTRICO NA SOLUBILIZAÇÃO DE K E PRODUTIVIDADE NA CULTURA DE ALFACE

#### MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado na Fazendinha Agroecológica Km47, sediada no município de Seropédica, RJ, que apresenta 33 metros de altitude, nas coordenadas latitude -22,7531 e longitude -43,7159, com um clima do tipo Aw, segundo a classificação de Koppen Geiger.

O delineamento experimental foi de blocos casualizados, com quatro doses de ácido cítrico- AC - (5, 10, 20 e 40 kg.ha<sup>-1</sup>), remineralizador fonolito com dose de 60 kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>, um controle sem ácido, um controle com sulfato de potássio na dose 60 kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup> e quatro repetições. Os tratamentos foram:

- 1-Fonolito
- 2-Fonolito + AC 5 kg.ha<sup>-1</sup>
- 3-Fonolito + AC 10 kg.ha<sup>-1</sup>
- 4-Fonolito + AC 20 kg.ha<sup>-1</sup>
- 5- Fonolito + AC 40 kg.ha<sup>-1</sup>
- 6- K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- 7- Zero

A Tabela 27 apresenta a análise de solo da área experimental.

**Tabela 27.** Análise do solo da área experimental

	Al	Ca	H+Al	Mg	K	P	pH	N	C
----- cmolc.dm <sup>-3</sup> -----									
0-20 cm	0,0	2,40	1,73	1,01	116,90	41,40	6,29	0,10	0,86

O preparo do solo foi realizado com grade aradora e, posteriormente, com encanteiradora, utilizada para fazer os canteiros. As parcelas apresentaram 1m<sup>2</sup> de tamanho e o plantio foi realizado com alface crespa (semeada em bandejas, 30 dias antes), com espaçamento de 0,20m x 0,25m. Foi realizada a adubação nitrogenada (na dose de 100 kgN.ha<sup>-1</sup>) da área com o resíduo de cervejaria, seco, anteriormente, em estufa com plástico agrícola. Para obter a análise de nutrientes do resíduo, foi separada uma amostra e colocada em estufa de ventilação forçada, com temperatura de 65°C até atingir massa constante. Após o processo de secagem, o material foi triturado em moinho de facas tipo Willey. As amostras foram separadas e levadas ao Laboratório de Química Agrícola da Embrapa Agrobiologia para determinação do teor de macronutrientes. A análise de N na biomassa foi baseada no método Kjedahl. O P foi analisado pelo método colorimétrico, o K por fotometria de chama e o C e o Mg pelo método de absorção atômica, de acordo com os procedimentos descritos por Nogueira e Souza (2005).

**Tabela 28.** Análise de nutrientes do resíduo de cervejaria

	Ca	K	Mg	P	N
----- g.kg <sup>-1</sup> -----					%
Resíduo de cervejaria	0,93	0,46	1,08	3,59	3,86

A colheita do material foi realizada após 35 dias o plantio, no dia 18 de setembro de 2024. Para a cultura da alface, foram avaliados o número de folhas por planta, a área foliar, a massa planta e a produtividade total. Para determinação da área foliar, após a coleta das plantas, as folhas foram levadas imediatamente ao laboratório e passaram por um integrador de área foliar, modelo LI-COR 3100, determinando-se a área foliar total. As amostras foram separadas e levadas ao Laboratório de Química Agrícola da Embrapa Agrobiologia, para determinação do teor de macronutrientes, de acordo com os procedimentos descritos por Nogueira e Souza (2005).

A análise estatística dos dados foi realizada no programa R 4.2.2 (R Core Team, 2022). Foi utilizada análise de variância, as médias foram comparadas por meio do teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade, e as análises das doses foram feitas por regressão linear.

## **10. ANEXO III**

### **AVALIAÇÃO DO SINERGISMO DO SULFATO DE POTÁSSIO COM O FONOLITO E O FONOLITO HIDROTERMALIZADO NA PRODUTIVIDADE DE MILHO EM VASO**

O experimento foi realizado em casa de vegetação da Embrapa Agrobiologia no município de Seropédica, RJ. O delineamento experimental foi de blocos casualizados, com dois remineralizadores, o fonolito e o fonolito hidrotermalizado, com dose de 400kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>, com e sem sulfato de potássio, mais um controle sem adubação potássica, um controle com sulfato de potássio e quatro repetições. Os tratamentos foram:

1-Fonolito 400kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>

2- Fonolito hidro. 400kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>

3- Fonolito 200kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>+ K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 200kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>

4- Fonolito hidro. 200kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>+ K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 200kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>

5- K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 400kg K<sub>2</sub>O.ha<sup>-1</sup>

6- Zero

Foram utilizados vasos plásticos com capacidade de 2 dm<sup>3</sup> e foi semeado o milho AG1051, tendo sido mantidas três plantas em cada vaso. Foram analisadas a altura maior das plantas, o diâmetro médio, a massa seca e fresca da parte aérea e a massa seca da raiz, além do teor de nutrientes na parte aérea e no sistema radicular.

O solo utilizado nos vasos foi retirado da área experimental da Embrapa Agrobiologia, no Terraço e, na tabela abaixo, é apresentada a análise de solo obtida.

#### **Análise da terra utilizada como substrato para os vasos**

Al	Ca	H+Al	Mg	K	P	pH	N	C
----- cmolc.dm <sup>-3</sup> -----								
0,0	0,64	1,62	0,23	18,45	5,43	5,69	0,029	0,511

Após sete dias do plantio, foi aplicada solução nutritiva para vasos de Leonard, segundo Norris (modificada), retirando-se o potássio e o ácido cítrico da solução, que contou, então, com a composição de CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O; MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O; CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O; ZnSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O; MnSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O; (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>.4H<sub>2</sub>O; H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> e FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O. Foram aplicados 50ml da solução por vaso.

A adubação fosfatada foi realizada com o termofosfato (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 17%) e foram adicionados

1,40 g por vaso. A adubação nitrogenada foi feita com resíduo de cervejaria (Tabela 29), após 14 dias do plantio, utilizando 10g por vaso. A coleta do material foi realizada 75 dias após a semeadura, em 10 de setembro de 2024.

**Tabela 29.** Análise de nutrientes do resíduo de cervejaria

	Ca	K	Mg	P	N
	----- g.kg <sup>-1</sup> -----				
Resíduo de cervejaria	0,93	0,46	1,08	3,59	3,86

Para obter a análise de nutrientes, foi separada uma amostra e colocada em estufa de ventilação forçada, com temperatura de 65°C até atingir massa constante. Após o processo de secagem, o material foi triturado em moinho de facas tipo Willey. As amostras foram separadas e levadas ao Laboratório de Química Agrícola da Embrapa Agrobiologia para determinação do teor de macronutrientes, de acordo com os procedimentos descritos por Nogueira e Souza (2005).

A análise estatística dos dados foi realizada no programa R 4.2.2 (R Core Team, 2022). Foi utilizada análise de variância e as médias foram comparadas por meio do teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade.

## RESULTADOS

Altura, diâmetro, pesos seco da parte aérea e raiz das plantas de milho cultivadas em vasos

Tratamento	Produção de biomassa do milho			
	Altura <sup>ns</sup>	Diâmetro <sup>ns</sup>	Peso seco Parte	Peso Seco Raiz
			aérea	----- g -----
	cm	mm		
1 -Fonolito	58,2	5,18	15,65 C	12,20 B
2 -Fonolito hidro.	58,57	5,13	15,85 C	12,05 B
3 -Fonolito + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	60,05	6,2	19,02 B	15,17 A
4 -Fonolito hidro. + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	54,47	5,71	18,92 B	13,92 A
5 -K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	59,82	6,99	20,67 A	14,27 A
6 -Zero	49,07	4,77	15,57 C	12,17 B
Média	56,7	5,66	17,62	13,3
CV%	12,3	22,7	5,81	9,47

Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Scott-Knott

Gráfico da produtividade de biomassa de milho plantado em vasos

