

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA

PEDRO HENRIQUE VARGAS DE ARAUJO

**REMINERALIZADORES DE SOLO COMO FONTES ALTERNATIVAS DE
POTÁSSIO NA CULTURA DA SOJA**

Uberlândia- MG

2025

PEDRO HENRIQUE VARGAS DE ARAUJO

**Remineralizadores de Solo como Fontes Alternativas de Potássio
na Cultura da Soja**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Ciências
Agrárias da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito parcial
para obtenção do grau de Engenheiro
Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Wedisson
Oliveira Santos

Uberlândia- MG
2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

A663 Araujo, Pedro Henrique Vargas de, 2002-
2025 Remineralizadores de Solo como Fontes Alternativas de
Potássio na Cultura da Soja [recurso eletrônico] / Pedro
Henrique Vargas de Araujo. - 2025.

Orientador: Wedisson Oliveira Santos.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Agronomia.
Modo de acesso: Internet.
Inclui bibliografia.

1. Agronomia. I. Santos, Wedisson Oliveira,1981-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia.
Graduação em Agronomia. III. Título.

CDU: 631

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

PEDRO HENRIQUE VARGAS DE ARAUJO

**Remineralizadores de Solo como Fontes Alternativas de Potássio
na Cultura da Soja**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Agronomia
da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito parcial
para obtenção do grau de
Engenheiro Agrônomo.

Uberlândia-MG, 05/05/2025

Banca Examinadora:

Larissa Carmelina Pinto- Eng. Agrônoma (UFU)

Igor Forigo Beloti- Doutor (ICIAG/UFU)

Wedisson Oliveira Santos – Doutor (ICIAG/UFU)

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo
estímulo, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor e amigo Wedisson Oliveira Santos o incentivo, motivação e orientação nesta caminhada acadêmica.

Aos técnicos do Laboratório de Análise de Solos e Tecido Vegetal-LABAS, Igor Beloti, Jéssica Mieko e Rafael Finzi por toda instrução e acompanhamento durante as análises.

À Rede de Laboratório Multusuários da UFU, na pessoa do técnico Flaysner Magayver Portela pelo cuidado e atenção empregados na realização da microscopia eletrônica.

Aos colegas integrantes do Núcleo de Química e Fertilidade do Solo: Arthur Henrique, Carolina, Geovanna, Gustavo, Hanna, Isabella, Lais, Leonardo, Marcela, Marcos, Mateus e Pedro pelo apoio, participação e companheirismo que tornaram a condução do trabalho mais leve e prazerosa.

Agradeço também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas (**APQ-01968-23- FAPEMIG**) pelo fomento ao projeto e pela oportunidade de Iniciação Científica.

RESUMO

A elevada dependência do Brasil por importação de fertilizantes potássicos tem incentivado a busca por fontes alternativas de potássio (K), como pós de rochas aluminossilicáticas, incluindo os remineralizadores de solo. Diante disso, é essencial avaliar a eficiência agronômica desses materiais, considerando suas variabilidades em termos de composicional e reatividade, bem como as diferentes condições de cultivo do país. Este estudo teve como objetivo caracterizar e avaliar a eficiência agronômica de quatro remineralizadores de solo produzidos em Minas Gerais (Verdete, Fonolito, Kamafugito e Basalto) e o comportamento de quatro extratores na predição do K disponível nos solos tratados com esses materiais. A composição mineralógica foi determinada por difratometria de raios X. Em condições de campo, com cultivo de soja, foram testados os quatro remineralizadores, além de um tratamento controle (sem adição de K) e uma fonte de referência (KCl). Avaliou-se o efeito dos tratamentos na produtividade da soja, no acúmulo de K e no desempenho de extratores de formas disponíveis desse nutriente. Os tratamentos foram distribuídos em delineamento de blocos casualizados, com cinco repetições. Cada parcela útil mediu 2,5 x 8 m, e foram coletadas 25 plantas por parcela para estimar a produtividade. Para análise dos extratores, foram coletadas cinco amostras de solo por parcela na camada de 0-20 cm. Os resultados indicaram que o verdete e o fonolito apresentaram os maiores teores de K, enquanto o basalto mostrou o menor teor. No campo, o KCl proporcionou o maior incremento de produtividade (26%), seguido pelo verdete (10%). Os extratores ácidos, como Mehlich-1 e Mehlich-3, foram mais eficientes em extraír K dos solos tratados com remineralizadores. Conclui-se que os remineralizadores têm potencial como fontes alternativas de K, mas sua eficácia é limitada pela baixa reatividade no curto prazo. O estudo reforça a necessidade de mais pesquisas para otimizar o uso desses materiais na agricultura, visando a redução da dependência de fertilizantes importados.

Palavras-chave: *Glicine max*, Remineralizadores, Rochagem, Adubação Potássica, Agrogeologia.

ABSTRACT

Brazil's high dependence on the importation of potassic fertilizers has encouraged the search for alternative sources of potassium (K), such as aluminosilicate rock powders, including soil remineralizers. In this context, it is essential to evaluate the agronomic efficiency of these materials, considering their compositional variability and reactivity, as well as the different cultivation conditions across the country. This study aimed to characterize and assess the agronomic efficiency of four soil remineralizers produced in Minas Gerais (Verdete, Phonolite, Kamafugite, and Basalt) and to evaluate four extractants in the prediction of available K in treated soils.. The mineralogical composition was determined by X-ray diffraction. Under field conditions, with soybean cultivation, the four remineralizers were tested in addition to a control treatment (no K addition) and a reference source (KCl). The effects of the treatments on soybean yield, K accumulation, and the performance of extractants for available forms of this nutrient were evaluated. The treatments were arranged in a randomized block design with five replications. Each useful plot measured 2.5 x 8 meters, and 25 plants were collected per plot to estimate yield. For the analysis of extractants, five soil samples were collected per plot from the 0–20 cm layer. The results indicated that verdete and phonolite had the highest K contents, while basalt showed the lowest. In the field, KCl resulted in the highest yield increase (26%), followed by verdete (10%). Acid extractants such as Mehlich-1 and Mehlich-3 were more efficient in extracting K from soils treated with remineralizers. It is concluded that remineralizers have potential as alternative sources of K, but their effectiveness is limited by low short-term reactivity. The study reinforces the need for further research to optimize the use of these materials in agriculture, aiming for reduction in dependence on imported fertilizers.

Keywords: *Glicine max* ; Remineralizer; Rock dust; Potassium fertilization; Agrogeology.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 MATERIAL E MÉTODOS	11
2.1. Caracterização Química e Mineralógica	11
2.2 Experimento de Campo	12
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
3.1. Análises Química e Mineralógica	12
3.1.1. Análise Química	12
3.1.2. Análise Mineralógica	15
3.2. Experimento à Campo.....	17
4. CONCLUSÃO.....	22
REFERÊNCIAS	23
ANEXO 1 – TABELA RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO POR EDS26	

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a produção nacional de fertilizantes tem apresentado estagnação, enquanto a demanda, crescente, é majoritariamente suprida por importações, que cresceram 440 % entre os anos 1998 e 2021 (ANDA apud GHIRALDELLI; FREUA, 2022). Em 2023, o Brasil importou 39,4 milhões de t de fertilizantes intermediários, o que representou mais de 85 % do consumo doméstico (ANDA, 2024). Esse cenário atingiu um novo recorde em janeiro de 2024, com incremento de 2,77 milhões de t (CONAB, 2024). A situação é ainda mais crítica para o potássio (K), cuja dependência externa alcançou aproximadamente 96% do consumo interno em 2024 (GOTTEMS, 2024). Essa elevada dependência torna o Brasil extremamente vulnerável a flutuações de preços e crises geopolíticas, como ocorrido em 2022 no início do conflito entre Rússia e Ucrânia, que desencadeou uma grave crise no setor.

Diante desse contexto, fontes alternativas de K, como os Remineralizadores de Solo (RS), também conhecidos como Agrominerais ou Pós-de-rocha, têm ganhado destaque. Definidos pela legislação brasileira como materiais de origem mineral moídos e, que aplicados ao solo podem disponibilizar nutrientes e, ou melhorar suas propriedades físicas, químicas e, ou biológicas (BRASIL, 2013), os RS emergem como uma potencial solução para reduzir a dependência do país por K. No entanto, embora algumas rochas silicáticas apresentem teores expressivos de K, esse nutriente encontra-se retido com elevada energia nas estruturas de micas e feldspatos - principais minerais aluminossilicáticos potássicos encontrados nos RS, cuja velocidade de dissolução/liberação depende de fatores como composição mineralógica do material, reatividade, atributos do solo, condições edafoclimáticas e interações com a biota (ALMEIDA et al., 2022). Essa complexidade dificulta a recomendação generalizada de RS e exige estudos à nível local para validar suas eficácia.

Persistem lacunas científicas sobre como esses fatores influenciam a eficiência dos RS como fertilizantes, bem como a carência de métodos padronizados para avaliar a disponibilidade de K em solos tratados com

esses materiais. Diante dos desafios apresentados, este trabalho teve como objetivos avaliar a eficiência agronômica dos principais RS comercializados em Minas Gerais como fontes de K na cultura da soja, e verificar o comportamento de extractores de formas disponíveis do nutriente em solo tratado com esses materiais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionados para o estudo cinco remineralizadores de solo produzidos no estado de Minas Gerais: **Basalto**, rocha ígnea extrusiva, proveniente de magma de composição máfica e de ampla distribuição na Formação Serra Geral. O Remineralizador comercial é produzido em Uberlândia-MG; **Verdete**, rocha do grupo das ardósias, metassedimentar, encontrada na serra da saudade, formada no Cráton de São Francisco, localizado na região Central Mineira, extraída no município de Cedro do Abaeté, na região do Alto Paranaíba; **Kamafugito**, termo guarda-chuva que designa um grupo de rochas ígneas, em geral intrusivas, lámprófitas, provindas de magma de composição ultramáfica, com origem no Grupo Mata da Corda, Formação Patos, extraído na região Alto Paranaíba, no município de Presidente Olegário; e **Fonolito**, rocha ígnea extrusiva, proveniente de magma de acidez intermediária, com formação no Complexo Alcalino de Poços de Caldas, extraído no município de Poços de Caldas, na região intermediaria de Pouso Alegre, região Sul do estado de Minas Gerais.

2.1. Caracterização Química e Mineralógica

A caracterização mineralógica das amostras de rochas foi realizada por meio de Difratometria de Raios X (DRX), uma técnica que, através da detecção dos ângulos de difração dos minerais em planos de espalhamento, permite o cálculo da distância interplanar na estrutura mineral conforme Lei de Bragg (Bragg & Bragg, 1913), que estabelece que, quando há interação construtiva de ondas, pode-se utilizar a seguinte equação: $n\lambda = 2d \sin\theta$, sendo n : ordem de difração, λ : comprimento de onda, d = distância interplanar e θ : ângulo de incidência. Essa equação se baseia em dois princípios: a igualdade dos ângulos de incidência e de difração, e a diferença do comprimento do caminho ser igual a um número inteiro de comprimentos de onda.

O ensaio foi conduzido na unidade Campus Santa Mônica, da Rede de Laboratórios Multiusuários da Universidade Federal de Uberlândia. Amostraram-se 10 g de cada RS, que foram moídos manualmente em almofariz de ágata, passados por peneira de malha 20 µm e submetidas a DRDX em equipamento marca LabX modelo XRD-6100. Utilizou-se tubo com catôdo de Cu (1,5418 nm).

Os resultados da difratometria foram submetidos à lei de Bragg para cálculo das distâncias interplanares, que então foram identificadas comparando-as aos dados do *American Mineralogist Crystal Structure Database* (RRUFF), um banco de dados que compila resultado de trabalhos publicados nas revistas de mineralogia dos EUA, Canada, do Jornal Europeu de Mineralogia, Química e Física dos Materiais, além de outras publicações selecionadas pela sociedade de mineralogia dos EUA (Downs e Hall-Wallace, 2003).

2.2 Experimento de Campo

O experimento foi instalado na Área Experimental do Núcleo de Química e Fertilidade do Solo- NQFS, na Fazenda Experimental do Glória, no município de Uberlândia-MG, com latitude 18° 57' 36" S, e longitude 48° 12' 30". Em região de clima Aw, clima tropical de savana com inverno seco, conforme sistema de Köppen-Geiger (Alvares et al., 2013). Os tratamentos consistiram em seis fontes de K (KCl, Basalto, Fonolito, Verdete, Kamafugito) e um controle (sem aplicação de K), os quais foram distribuídos em Delineamento de Blocos Casualizados, com cinco repetições. A parcela experimental consistiu-se em área 8 x 2,5 m, totalizando cinco linhas distanciadas entre si em 0,5 m, sendo quatro úteis. O preparo de solo foi realizado em sistema de cultivo mínimo, empregando grade aradora. Para correção da área aplicou-se 3,0 t/ha de calcário dolomítico visando elevar a saturação por bases (V) para 65%. A adubação de semeadura foi realizada com 400 kg/ha de superfosfato simples no sulco de semeadura.

Os tratamentos foram aplicados à lanço 15 d antes da semeadura da soja, considerando a dose de 150 kg/ha K₂O e os teores totais de K nas diferentes fontes informados pelos fabricantes, resultando em 258,6 kg/ha KCl, 12 500 kg/ha Basalto, 1 875 kg/ha Fonolito e Verdete, e 5 000 kg/ha de Kamafugito. A semeadura foi realizada em 18/11/2023 e a colheita aos 112 dias após a semeadura (DAS).

Ao longo do ciclo, foram realizadas duas aplicações de herbicida, com Glifosato sal-de-amônio, na dosagem de 1,44 kg/ha de equivalente ácido. Também foram realizadas aplicações de fungicidas e inseticidas, conforme a recomendação técnica.

Aos 105 DAS foram coletadas aleatoriamente amostras de 20 plantas, que foram submetidas à secagem em estufa à 60 °C até atingir massa constante, e então, foram utilizadas para estabelecer a massa de raízes, de hastes, folhas e pecíolos, uma vez, que na maturidade completa, a planta apresentaria sinais de senescência como o desfolhamento, que dificulta o cálculo da massa alocada em cada tecido.

A colheita, de forma manual, foi realizada no dia 09/03/2024, com arranquio de 20 plantas/parcela. Em seguida, foram submetidas à pré-secagem ao ar, por 7 d, e então foi realizada secagem em estufa à 60 °C até atingir massa constante, seguiu-se a trilhagem em trilhadora de plantas individuais, e separação das partes da planta: hastes, valvas do legume, e grão, neste último à umidade foi corrigida para 13 %, grau de referência comercialização, à nível de cálculo. A partir da produtividade foi definida a Eficiência Agronômica Relativa conforme a formula $EAR(%) = \frac{Y - RY_0}{Y_0 - RY_0} \times 100$, na qual Y, Y₀ e RY₀ = produtividade média do tratamento de interesse, produtividade do tratamento de referência e produtividade da parcela controle sem aplicação do nutriente, respectivamente (PEARCE et. al, 2022). As raízes foram descartadas por ser um material de análise trabalhosa em decorrência da contaminação por componentes do solo e fragilidade de suas regiões mais finas. Os dados de pesagem dos grãos

foram utilizados para cálculo do nível de produtividade proporcionada por cada tratamento.

Uma semana após a colheita das plantas amostrou-se o solo para análise química do K residual, na profundidade de 0-20 cm. Foram coletadas 5 amostras simples por parcela para formação da amostra composta. O material foi deixado secar ao ar, destorrado com rolo da massa até passar por peneira com malha de 2 mm, para obtenção da terra fina seca ao ar-TFSA (TEIXEIRA et. al., 2017).

2.3 Análises de Laboratório

A análise do material vegetal foi realizada nas dependências do LABAS-Laboratório de Análise de Solo e Tecido Vegetal da Universidade Federal de Uberlândia, localizado no Campus Umuarama. As amostras de tecido vegetal foram moídas em moinho tipo Willey, marca Tecnal, modelo R-TE-650/1. A partir do material moído, sub-amostras de 0,200 g foram submetidas à mineralização ácida por meio de digestão úmida em águarégia ($\text{HCl} + \text{HNO}_3$ na proporção 3:1) à 150 ° (Embrapa, 1999). A dosagem analítica de K nos extratos foi realizada por espectrofotometria de emissão de chamas, em fotômetro modelo Micronal b-465. O conteúdo de K (kg/ha) foi obtido a partir dos teores de K em cada órgão vegetal multiplicados pelas respectivas massas e número de plantas por ha.

As amostras de solo pós-cultivo foram analisadas quanto ao teor de K em diversos extratores, a citar: Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L^{-1} e H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1}) (MEHLICH, 1978), Mehlich-3(CH_3COOH 0,2 mol L^{-1} ; NH_4NO_3 0,25 mol L^{-1} ; NH_4F 0,015 mol L^{-1} ; HNO_3 0,013 mol L^{-1} e EDTA 0,001 mol L^{-1}) (MEHLICH, 1984), CaCl_2 (0,5 mol L^{-1}), $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{CO}_2$ à pH 7,0 (1 mol L^{-1}) e NH_4Cl (1 mol L^{-1}) objetivando relacionar os teores extraídos com os conteúdos de K. A dosagem analítica de K nos extratos foi realizada por espectrofotometria de emissão de chamas.

Os resultados foram submetidos à análise de variância, pelo teste F e ao teste de médias, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Posteriormente, os dados foram relacionados aos resultados da análise de tecidos vegetais para cálculo da recuperação pelo extrator.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análises química e mineralógica

3.1.1. Análise química

A composição química das rochas, considerando os elementos químicos mais concentrados está apresentada na Tabela 1. Observou-se que os teores de O, Si apresentaram baixa variação entre as amostras de rocha, enquanto as concentrações de K, Ca, Mg e Na foram muito variáveis. Em todos os remineralizadores, a soma de bases ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$) atingiu valores superiores à 9% em massa, atendendo aos requisitos estabelecidos pela legislação. Adicionalmente, verificou-se conformidade para elementos potencialmente tóxicos (As, Cd, Hg e Pb), cujos teores encontram-se abaixo dos limites máximos permitidos. Ressalta-se, porém, que a técnica analítica empregada, com precisão de 0,01 %, não possui sensibilidade para quantificar Hg quando em concentrações inferiores a 0,1 mg/kg. O teor de K verificado na amostra de Basalto, caso confirmado, poderia implicar em impossibilidade de comercialização do material, visto que a concentração mínima para comercialização no Brasil é de 1% de K_2O , conforme IN 5/2016 (MAPA, 2016). Contudo, há de se ressaltar, que a técnica de EDS, apesar de precisa, apresenta baixa acurácia em decorrência da reduzida quantidade de material que analisa (cilindros com 230 mm de diâmetro) (Bierman e Gillespie, 1991).

Tabela 1. Concentração (%, massa/massa) de alguns elementos nas amostras dos Remineralizadores, quantificados por EDS.

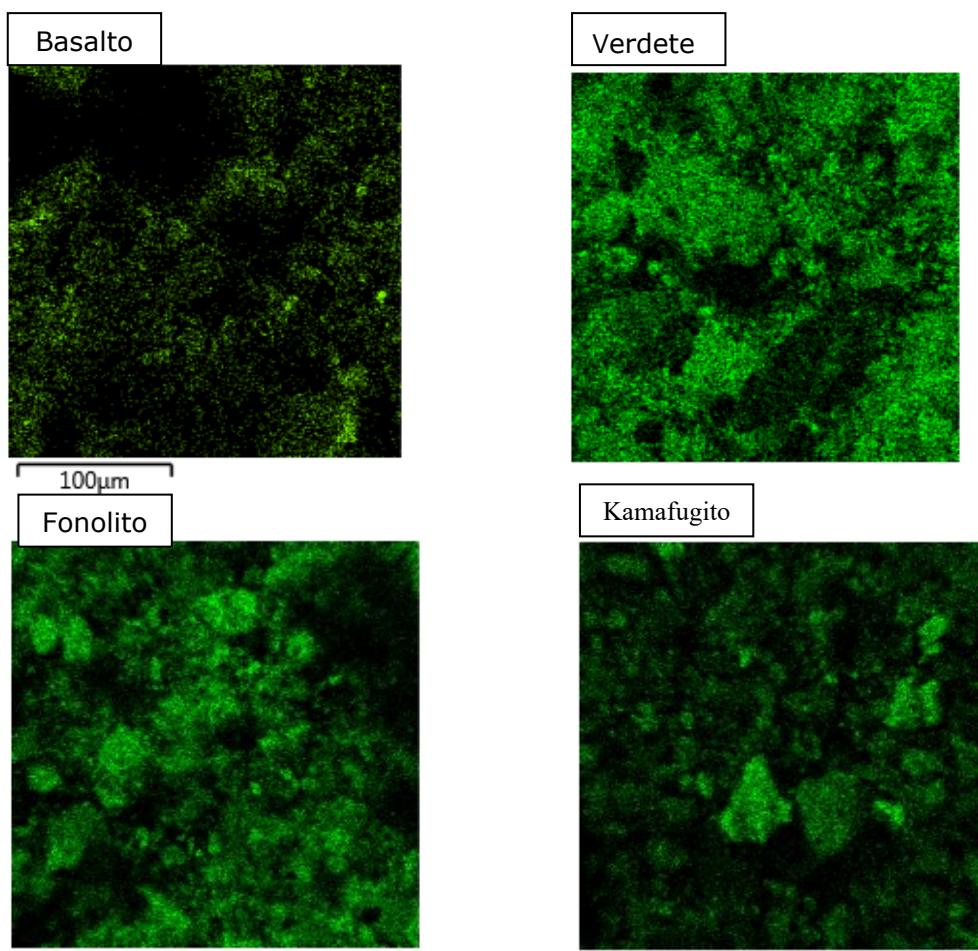
Elemento	Remineralizador			
	Basalto	Verdete	Kamafugito	Fonolito
	-----% m/m-----			
O	47,30	48,44	47,53	49,02
Si	16,67	18,48	16,03	18,41
K	0,54	6,52	2,62	5,36
Ca	4,75	1,07	0,62	1,15
Mg	2,52	1,70	4,08	0,06
Na	1,77	0,07	0,62	4,69

*A tabela completa com os 25 elementos que foram mensurados está inserida em Anexo 1.

Como comparativo a este resultado, utilizando a técnica de fluorescência de raios X (XRF), Toscanni e Campos (2017) mediram teor de 0,96% de potássio no Basalto, que corresponde à 1,23% de K₂O, que atenderia a exigência legal de registro. Apesar de funcionar pelo mesmo princípio, e usar tecnologia muito semelhante, muitas vezes até o mesmo sensor, a técnica de XRF alcança uma acurácia superior na quantificação, uma vez que a técnica EDS-MEV trabalha em regiões das amostras com formações minerais bem definidas, e tem baixa cobertura em termos de área (Yale, 2024). Ademais, utilizando detector de Energia Dispersiva de Raios X, Rizzi (2024) verificou concentrações semelhantes de elementos em amostras de Fonolito e de Verdete. Santos et. al. (2015) verificaram teores de K no verdete variando entre 4,0 e 7,5 dag/kg (%). Pelo método da dissolução triácida-EPA 3052, uma metodologia de elevada confiabilidade. IBRA apud Guerra (2023) atestou um teor mínimo de K de 1,84% no Fonolito pelo método da dissolução ácida, teor inferior, ao que se verificou nesse trabalho, provavelmente em função de variações entre lavras.

Os mapas com distribuição espacial de K nas amostras são apresentados na Figura 1. Observou-se distribuição uniforme de K nas amostras, sobretudo no Verdete e no Fonolito. No Basalto, nota-se a existência de menos pontos coloridos, o que pode ser justificado pelo resultado do MEV-EDS, que detectou um baixo teor de K nesse remineralizador. O Kamafugito demonstrou ser o material com distribuição mais heterogênea para esse elemento, com presença de ambientes mais concentrados.

Figura 1. Mapa de distribuição de K em amostras de remineralizadores



Fonte: Autor

3.1.2. Composição Mineralógica dos Remineralizadores

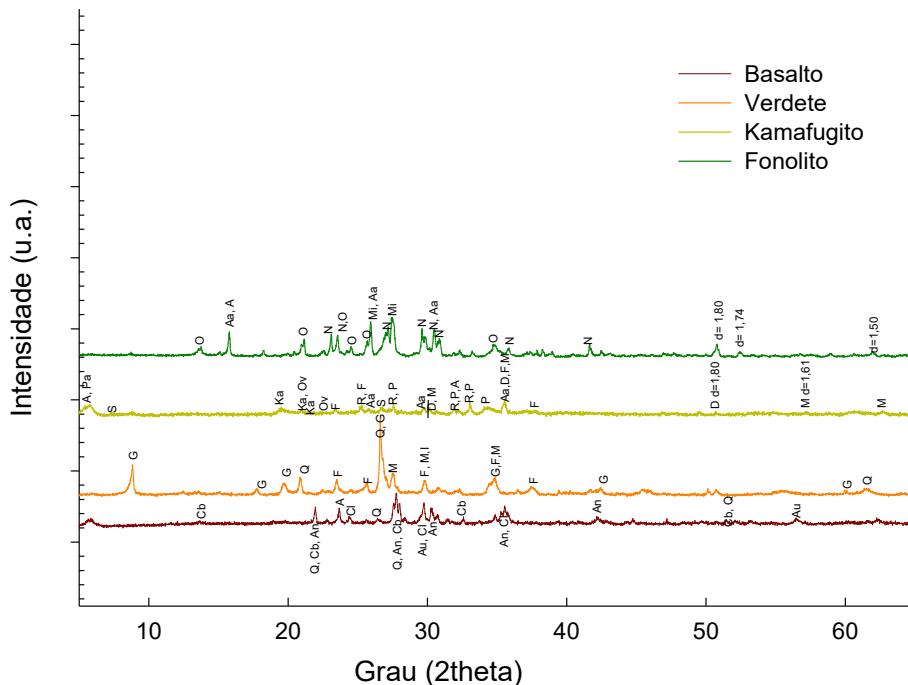
Com base na caracterização mineralógica por DRX (Figura 2) identificou-se a presença dos seguintes minerais nos Remineralizadores: cubanita ($d=3,21; 4,05; 3,21; 2,74$ e $1,78 \text{ \AA}$), quartzo ($d=4,05; 3,21$ e $1,78 \text{ \AA}$), andesina ($d= 4,05; 1,65; 3,21; 1,53; 2,52$ e $2,14 \text{ \AA}$), augita ($d= 1,65$ e $1,63 \text{ \AA}$) e clinopiroxênio ($d= 3,65; 1,65$ e $2,62 \text{ \AA}$), no Basalto. Glauconita ($d= 10,01; 4,99; 4,51; 3,34; 2,57; 2,12$ e $1,54 \text{ \AA}$), quartzo ($d= 4,26; 3,34$ e $1,51 \text{ \AA}$), forsterita ($d= 3,78; 3,48; 3,00; 2,57$ e $2,40 \text{ \AA}$) e muscovita() no Verdete. Peroviskita ($d= 3,23; 2,80; 2,71$ e $2,61 \text{ \AA}$), caulinita ($d= 4,55; 4,24; 4,06 \text{ \AA}$), olivina ($d= 4,24$ e $3,98 \text{ \AA}$), forsterita ($d= 3,81; 3,52; 2,52$ e $2,42 \text{ \AA}$), richterita ($d= 3,23; 2,80$ e $2,71 \text{ \AA}$), analcita ($d= 3,45; 3,00$ e $2,80 \text{ \AA}$), diopsídio ($d= 2,96; 2,52$ e $1,80 \text{ \AA}$), e muscovita ($d= 2,96; 2,52; 1,61$ e $1,48 \text{ \AA}$) no kamafugito. Ortoclásio ($d= 6,64; 4,20; 3,78 \text{ \AA}$), andesina ($d= 5,62; 2,93 \text{ \AA}$), microclíneo($3,44$ e $3,25 \text{ \AA}$), e nefelina ($d=3,85; 3,78; 3,28; 2,90; 2,51; 2,35$ e $2,17 \text{ \AA}$) no Fonolito (Figura 2).

A composição mineralógica das rochas é coerente com outros trabalhos. Teixeira et al. (2011, 2012) caracterizando rochas fonolíticas de Planalto de Poços de Caldas, encontraram assinaturas DRX para microclínio, ortoclásio, andaluzita, nefelina e andesina. Ainda no Fonolito, Rizzi (2024) identificou sanidina, ortoclásio, microclínio, nefelina, andesina e analcima. Em ambos os casos, verifica-se a presença de feldspatos potássicos e feldspatóides, como principais fontes de K. A composição do Basalto pode variar principalmente em função da composição do magma e ambiente de formação sendo classificado em famílias conforme o sistema denominado tetraedro basáltico, apesar disso é comum a presença de minerais dos grupos dos piroxênios, plagioclásios e feldspatos (Hassaan, 2001; Pavlovic et al., 2019; Amim et al., 2020).

Analizando magmas kamafugíticos de diferentes partes do mundo, Innocenzi et al. (2024) verificaram a presença nas rochas kamafugíticas de nefelina, diopsidio, apatita, flogopita, olivina, augita etc, em todas as formações, o predomínio quantitativo nas amostras foi do clinopiroxênio,

ocupando em torno de 50% da composição mineralógica. Também é bastante generalizada a ocorrência de titanita, que apesar de não ter sido identificada pode estar presente na amostra em baixa concentração ou baixa cristalinidade. Teores de Ti variaram entre 1,0 e 3,0 dag/kg à depender da região do disco. Guerra (2023) identificou em amostra de Kamafugito, da região de Patos de Minas: analcime, paragonita, peroviskita, fosterita, diopsídio e muscovita.

Figura 2. Composição Mineralógica (DRX) de Remineralizadores de Solo produzidos no Estado de Minas Gerais.



*u.a- Unidade Arbitrária. Aa: Analcima; Ad: Andesina; An: Anortita; Au: Augite; Cl: Cinopiroxênio; Cb: Cubanita; D: Diopsídio; E: Esmectita; F: Fosterita; G: Glaucônita; I: Ilita; Ka: Kaolinita; K: K Feldspato-K; L: Leucita; N: Nefelina; Mf: Magnesioferrita; M: Muscovita; Mi: Microclíneo, Ov: Olivina; O: Ortoclasio; Pa: Paragonita; P: Peroviskita; Q: Quartzo; R: Richterita; S: Shirokshinita.

3.2. Eficiência Agronômica de Remineralizadores de Solo como Fontes de K

Verificou-se que não houve diferença entre as fontes de K quando a produtividade da soja, apesar do incremento médio de 26, 10, 5 e 1% na produtividade da soja com a pela aplicação de KCl, Verdete, Kamafugito e Fonolito, respectivamente (Tabela 2). Para a Eficiência Agronômica Relativa (EAR), que avalia o incremento de rendimento proporcionado por uma fonte qualquer em relação ao tratamento controle e a fonte de referência (KCl) nota-se que o Verdete se destacou entre os Remireralizadores, apresentando EAR de 38,1%. Pessoa et al. (2023) notaram baixa eficiência do Verdete e Fonolito *in natura* no aumento de produtividade em milho, essa divergência pode provir do efeito da acidificação da rizosfera, muito relevante no cultivo da soja, disponibilizando formas de nutrientes não disponíveis, conforme demonstrado por Zhou et. al. (2009) na disponibilização do P. O uso do Basalto, por sua vez, não refletiu em aumento de produtividade na primeira safra, muito provavelmente pela liberação de K por esse Remineralizador, como Luchese et al. (2021) demonstraram para a aplicação de doses entre 0 e 99 Mg/ha de Basalto, resulta em disponibilização quase nula de K em solo argiloso, mesmo considerando a liberação lenta de nutrientes atribuída aos remineralizadores, Hanisch et al. (2013) não obtiveram aumento de produtividade pela aplicação de basalto, ao longo de quatro safras, em SPD com rotação soja/aveia+ervilhaca, milho/aveia, soja/aveia+ervilhaca, milho.

Tabela 2. Produtividade da soja e Eficiência Agronômica Relativa considerando a aplicação de remineralizadores de solo como fontes de K.

Tratamento	Produtividade (sc/ha)	EAR (%)
Controle	53,89	-
Basalto	45,60	-
Verdete	59,33	38,06
Kamafugito	56,70	19,65
Fonolito	54,60	4,92
KCl	68,19	100
CV (%)	20.25 %	

Quando consideramos o teor de K nos órgãos vegetais, (Tabela 3.), o teor de K exportado foi superior nos tratamentos Controle e Basalto e Kamafugito, comparativamente aos demais. Quando consideramos também a produtividade (Tabela 2). É possível constatar que tais tratamentos apresentaram também médias de produtividade numericamente inferiores, o que pode parecer um contrassenso num primeiro momento, mas, conforme elucidado por Jerrell e Berverly(1981), plantas menos nutridas com um determinado nutriente podem apresentar maiores concentrações de nutrientes no tecido vegetal como consequência do baixo crescimento vegetativo, fenômeno que ficou conhecido como “efeito de diluição”.

Tabela 3. Teor de K nos tecidos vegetais da soja após a colheita, pela aplicação de RS

Tratamento	Grãos	Hastes	Cascas
----- (g/kg) -----			
Controle	198,0 a	18,0 a	110,0 b
Basalto	201,2 a	12,0 b	101,6 b
Verdete	170,0 b	25,9 a	162,0 a
Kamafugito	184,4 a	14,8 b	81,2 b
Fonolito	152,4 b	16,4 b	101,2 b
KCl	160,4 b	14,0 b	108,9 b
CV(%)	12,09	24,7	24,6

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. CV: Coeficiente de variação.

A alocação da biomassa média das 9 plantas amostradas foram: folhas com pecíolos representaram 17,88% da massa, raízes 4,23%, hastes 19,69% e vagens 58,19%, a massa média foi de 36,9g/planta. Na ocasião da colheita procedeu-se a pesagem das hastes, legumes, grãos e raízes, para o cálculo do conteúdo de K. Essas informações serviram como base para estimativa do conteúdo de K acumulado. Os tratamentos não resultaram em diferença estatisticamente significativa quando considera-se o conteúdo de K, apesar das diferenças em teor e em produtividade e acúmulo de biomassa. Vale a pena ressaltar, que, para chegar ao conteúdo de K, é necessário a multiplicação entre variáveis independentes (teor e massa), e que, portanto, envolve uma propagação de incertezas em quadratura. Partindo para apreciação das médias, os tratamentos ainda assim não apresentaram grandes diferenças, com exceção do Fonolito que apresentou acúmulo de apenas 49,11 kg/ha de K ao longo do ciclo (Tabela 4.).

Tabela 4. Conteúdo de K acumulado ao longo do ciclo da soja em função da aplicação de RS.

Tratamento	Conteúdo de K (kg/ha)
Controle	64,62 a
Basalto	56,48 a
Fonolito	49,11 a
Kamafugito	62,49 a
Verdete	61,85 a
KCl	62,73 a
CV(%)	24,3

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. CV: Coeficiente de variação.

Partindo para as análises de solo pós-colheita, foi mensurada diferença significativa para todos os extratores. De maneira geral, os extratores ácidos, à exemplo das soluções Mehlich-1 e Mehlich-3 acessaram teores superiores de K no solos tratados com remineralizadores (Verdete, Kamafugito e Fonolito) e no tratamento Controle, enquanto os extratores com mecanismo predominante de troca iônica extraíram menos em praticamente todas as situações, provavelmente esse comportamento se deve ao fato, destes extratores conseguirem acessar formas não disponíveis de K, principalmente formas estruturais e não trocáveis nos minerais primários (MELO et al., 2009).

Quando restrinhamos a análise apenas ao extrator Mehlich-1, nota-se para os tratamentos Controle e Verdete, teores maiores extraídos quando se utilizou do método de decantação para separação das partículas de solo em suspensão, quando comparado ao método de filtração, esse comportamento provavelmente se deve ao mesmo mecanismo já descrito anteriormente, em função do tempo de 16 h que o solo fica em contato com o extrator no método de decantação. Já no solo tratado com KCl, a diferença entre os extratores foi menor, apenas sendo inferior o Acetato de Amônio

à pH 7,0. Como o KCl apresenta o K na forma disponível, já era de se esperar diferenças menores entre os extratores. Para o solo tratado com Basalto, não houve diferença estatisticamente significativa entre os extratores, pelo teste F à 5% de probabilidade, em comparação numérica, nota-se que a utilização de extratores ácidos resultou em maiores teores extraídos, comportamento semelhante ao dos demais tratamentos.

Quando comparamos os tratamentos em relação ao extrator, foi constatada a superioridade do KCl em relação aos demais tratamentos, em todos os extratores, com exceção do Mehlich-1 com decantação, no qual não houve diferença entre KCl e Fonolito, estes sendo superiores aos demais.

Tratamento	NH ₄ CH ₃ CO ₂	CaCl ₂	NH ₄ Cl	M-1/decantação	M-1/filtração	M-3	CV ₂
			K extraído (mg/dm ³)				(%)
Controle	33,1 b C	38,5 b C	38,5 b C	40,9 b A	44,2 b B	42,6 b A	4,05
Basalto	27,5 b NS	33,7 b NS	31,1 b NS	37,3 b NS	36,5 b NS	35,8 b NS	6,39
Verdete	29,3 b C	37,8 b B	35,9 b B	41,7 b A	37,4 b B	40,1 b A	10,19
Kamafugito	30,7 b B	33,7 b B	34,7 b B	42,3 b A	38,6 b A	39,7 b A	15,30
Fonolito	28,3 b B	39,3 b A	38,7 b A	52,3 a A	42,6 b A	39,1 b A	8,29
KCL	54,1 a B	57,9 a A	58,7 a A	66,1 a A	62,5 a A	61,2 a A	3,02
CV(%) ₁	23,96	23,17	21,66	25,91	20,98	22,11	

*NS – Não significativa a 5% pelo teste F; Médias seguidas de mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si ($p < 0,05$), pelo teste de Scott-Knott. 1. Coeficiente de Variação referente à análise de tratamentos por extrator; 2. Coeficiente de Variação referente à análise de extratores por tratamento.

4 CONCLUSÃO

A composição mineralógica dos remineralizadores revela a presença de micas e feldspatos como fontes de K.

Os teores de K no Basalto podem limitar o registro e comercialização dessa rocha como remineralizador de solo.

O uso de diferentes extractores, como M-1, M-3 e NH4Cl, permitem acessar diferentes espécies de K nos remineralizadores.

O tempo de decantação da fase sólida, durante o processo de extração, afeta nos teores de K determinados, especialmente para os extractores ácidos (M-1 e M-3).

A não alteração dos teores disponíveis de K no solo no curto prazo (um ciclo cultural) após a aplicação de Basalto, Verdete, Fonolito e Kamafugito pode ser atribuída à baixa solubilidade e reatividade desses materiais.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22 n. 6, p. 711–728, 2013. doi:10.1127/0941-2948/2013/0507

AMIN, M; SUDIBYO; A ORDIANA,; KARO, P Karo. **Effect of basalt mineral concentration as PCC cement substitution material on mortar products**. Iop Conference Series: Earth and Environmental Science, [S.L.], v. 483, n. 1, p. 012009, 1 mar. 2020. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/483/1/012009>.

BIERMAN, P. R.; GILLESPIE A. R.; Accuracy of rock-varnish chemical analyses: Implications for cation-ratio dating. **Geology**, v. 19, n. 3, p. 196–199, 1991 doi: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0196:AORVCA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0196:AORVCA>2.3.CO;2)

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA; **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**, Brasília, 1999.

GUERRA, L. G. N. **Disponibilidade de K e P a partir de pó de Kamafugito em solos de diferentes classes texturais**. 2023. 24 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

GOTTEMS, L. **Dependência de fertilizantes ameaça o agro**. 2024. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/noticias/dependencia-de-fertilizantes-ameaca-o-agro_495180.html#:~:text=Em%202024%2C%20a%20produção%20de,

de%20sua%20deman... Acesso em: 15 abr. 2025.

HASSAAN, M. Y. Basalt rock as an alternative raw material in Portland cement manufacture. **Materials Letters**, v. 50, n. 2-3, p. 172-178, 2001.

MEHLICH, A. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc.

Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 9, p. 477-492, 1978.

MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of the Mehlich 2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 15, p.1409-1416, 1984.

MELO, V. F.; CASTILLOS, R. M. V.; PINTO, L. F. S. Reserva Mineral do Solo In: ALLEONI, L. R. F.; MELO, V. F. (Ed). **Química e mineralogia do solo**. Parte I – Conceitos básicos. SBCS, Viçosa, Minas Gerais, p. 381-426, 2009.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. **Instrução Normativa nº 5**, de 10 de março de 2016. Brasil: Dou, Seção 1, p. 10-11.

PAVLOVIC, M.; DOJCINOVIC, M.; PROKIC-CVETKOVIC, R.; ANDRIC. L.; CEGANJAC, Z.; TRUMBULOVIC, L.; Cavitation Wear of Basalt-Based Glass Ceramic. **Materials**. v. 12, n. 9, p. 1552, 2019; <https://doi.org/10.3390/ma12091552>

PEARCE, A. W., SLATON, N. A., LYONS, S. E., BOLSTER, C. H., BRUULSEMA, T. W., GROVE, J. H., JONES, J. D., MCGRATH, J. M., MIGUEZ, F. E., NELSON, N. O., OSMOND, D. L., PARVEJ, M. R., PENE-YEWTKHIW, E. M., & SPARGO, J. T. Defining relative yield for soil test

correlation and calibration trials in the Fertilizer Recommendation Support Tool. **Soil Science Society of America Journal**, v. 86, p. 1338–1353, 2022. <https://doi.org/10.1002/saj2.20450>

PROCHNOW, L. I. **EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS EM SISTEMAS AGRÍCOLAS DE PRODUÇÃO**. Palotina: Ipni Brasol, 2014. 106, Slide, P&B. Disponível em: [https://www.npct.com.br/npctweb/npct.nsf/article/BRS-3273/\\$File/P%20Palotina%2C%20V2.pdf](https://www.npct.com.br/npctweb/npct.nsf/article/BRS-3273/$File/P%20Palotina%2C%20V2.pdf). Acesso em: 12 nov. 2024.

TEIXEIRA, A. M. S.; SAMPAIO, J. A.; GARRIDO, F. M. S.; MEDEIROS, M. E. AVALIAÇÃO DA ROCHA FONOLITO COMO FERTILIZANTE ALTERNATIVO DE POTÁSSIO. **HOLOS**, v. 5, 2012, p. 21-33 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Natal

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p. il. color.

YALE (New Haven). West Campus Materials Caractherization Core. **XRF: Principle**. Disponível em: <https://ywcmatsci.yale.edu/gallery/xrf/principle>. Acesso em: 10 nov. 2024.

ZHOU, L. L[†] et al. Rhizosphere acidification of faba bean, soybean and maize. **Science of the Total Environment**, v. 407, n. 14, p. 4356-4362, 2009.

ANEXO 1 – TABELA RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO POR EDS

Elemento	Remineralizador			
	Basalto	Verdete	Kamafugito	Fonolito
% m/m				
C	8,61	8,77	15,91	8,30
O	47,30	48,44	44,72	49,02
F	-	0,00	0,00	0,21
Na	1,77	0,07	0,06	4,69
Mg	2,52	1,70	3,24	0,06
Al	5,89	6,37	3,14	9,21
Si	16,67	18,48	11,57	18,41
P	-	0,00	0,94	0,17
S	-	0,78	0,00	0,02
Cl	-	-	-	0,07
K	0,54	6,52	2,36	5,36
Ca	4,75	1,07	3,23	1,15
Ti	1,26	0,43	2,97	0,21
Cr	-	0,01	0,00	0,00
Mn	-	0,10	0,10	0,02
Fe	10,13	5,27	8,44	2,14
Co	-	0,04	0,02	0,00
Ni	-	0,04	0,02	0,02
Cu	-	0,24	0,15	0,17
Zn	-	0,00	0,01	0,05
As	-	0,00	0,00	0,00
Rb	-	0,00	0,00	0,00
Sr	-	0,00	0,00	
Y	-	0,00	0,00	0,00
Zr	-	0,00	0,00	0,02
Ba	-	0,06	0,52	0,04

Pb	-	0,10	0,02	0,00
U	-	0,00	0,00	0,06

*"-": não identificado na amostra. "0,00" identificado em níveis abaixo da sensibilidade do aparelho

Fonte: Autor