

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA**

PEDRO AUGUSTO MARQUES RIZZI

**LIBERAÇÃO DE K EM SOLO INCUBADO COM VERDETE E
FONOLITO**

**Uberlândia – MG
Abril – 2024**

PEDRO AUGUSTO MARQUES RIZZI

**LIBERAÇÃO DE K EM SOLO INCUBADO COM VERDETE E
FONOLITO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Agronomia, da Universidade Federal de Uberlândia, para obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Professor Dr. Wedisson Oliveira Santos.

**Uberlândia – MG
Abril – 2024**

PEDRO AUGUSTO MARQUES RIZZI

**LIBERAÇÃO DE K EM SOLO INCUBADO COM VERDETE E
FONOLITO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Agronomia, da Universidade Federal de Uberlândia, para obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Professor Dr. Wedisson Oliveira Santos.

Aprovado pela Banca Examinadora em 24 de abril de 2024.

Prof. Dr. Wedisson Oliveira Santos
Orientador

Polliana Silva Franco Ferreira
Membro da Banca

Caio Cesar Sales Gomes
Membro da Banca

**Uberlândia – MG
Abril – 2024**

RESUMO

A elevada dependência externa por fertilizantes potássicos da agricultura brasileira tem incentivado a busca por fontes alternativas de K, e dentro desse contexto estão os remineralizadores de solo. Portanto, o objetivo do trabalho foi avaliar a liberação de K em solo tratado com doses de dois remineralizadores, por meio de diferentes extratores. Amostras das rochas Verdete e Fonolito foram adquiridas de empresas que comercializam esses materiais como fontes de K. Após moagem, as amostras foram passadas em peneira de 0,074 mm para caracterização mineralógica, morfológica, estrutural e química, por energia dispersiva de raios X acoplada à microscopia eletrônica de varredura, e montagem do experimento de incubação. O experimento foi conduzido nas dependências do Laboratório de Análise de Solo e Tecido Vegetal (LABAS) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Para tanto, os tratamentos foram definidos pelo esquema fatorial $2 \times 3 \times 3 + 1$, sendo dois remineralizadores de solo (Verdete e Fonolito), três doses de K (25, 50 e 75 mg dm⁻³), três tempos de incubação (30, 60 e 90 d), e um tratamento controle (dose 0 de K). Os tratamentos foram distribuídos em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. Os dados dos teores de K foram submetidos inicialmente a análise de variância (ANOVA). O efeito de dose e tempo foi avaliado por meio de análise de regressão. Já os remineralizadores foram comparados pelo teste de Scott-Knott ($p=0,05$). Os principais minerais presentes nas rochas foram Glauconita, Quartzo e Ortoclásio, no Verdete e Ortoclásio e Sanidina, no Fonolito. Os elementos maiores (concentração superior a 1%) em ordem de abundância foram O, Si, K, Al, Fe e Mg, para o Verdete e O, Si, Al, K, Na e Fe, para o Fonolito. A solubilidade do Fonolito para K, nos extratores Mehlich-1, AcNH₄ e CaCl₂ foi maior que a rocha Verdete. Esse diagnóstico foi obtido pelo contraste entre as rochas quanto aos teores médios de K nos diferentes extratores e pelo efeito significativo de dose observado para a maioria dos tratamentos com o Fonolito, e não observados para o Verdete. O efeito de dose nos teores de K em CaCl₂ sugere que a rocha Fonolito é mais efetiva que o Verdete na liberação de K dentro de três meses de aplicação no solo. Entretanto, estudos envolvendo plantas serão necessários para uma constatação mais exata da biodisponibilidade.

Palavras-chave: Extratores; Potássio; Incubação; Remineralizadores

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. MATERIAL E MÉTODOS	8
2.1 Caracterização Mineralógica	8'
2.2 Caracterização morfológica, estrutural e química por Microscopia Eletrônica de Varredura	8
2.3 Ensaio de Incubação	9
2.4 Análise Estatística	9
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
3.1 Análises mineralógicas	10
3.2 Análises químicas EDS-MEV	11
3.3 Liberação de K.....	12
4. CONCLUSÃO.....	17
5. REFERÊNCIAS	18

1. INTRODUÇÃO

O K é o nutriente, cujo suprimento externo é mais preocupante para o agronegócio brasileiro, pois é importado em elevadas quantidades, cerca de 13 milhões t apenas em 2021 (Osaki, 2022). A produção de 80% de fertilizantes potássicos se restringe a 5 países (Canadá, Israel, Rússia, Bielorrússia e Alemanha) (SAE), sendo o Brasil o principal consumidor desses fertilizantes do mundo. De fato, cerca de 98% do K utilizado no Brasil para safra 2021/2022 foi importado (SNA, 2022).

A alta dependência da importação de fertilizantes potássicos na agricultura brasileira faz com que a demanda por fontes alternativas cresça, e nesse contexto está inserido os remineralizadores de solo, definidos pela Lei 12.890 (2013) como material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho por processos mecânicos 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 em propriedades físicas ou físico-químicas ou da atividade biológica do solo favoreceu o interesse comercial dos remineralizadores foi a publicação da Instrução Normativa nº 05/2016, a qual estabelece as diretrizes para esses materiais, especificando como garantia mínima de 1% de K_2O ; $\Sigma (CaO, MgO \text{ e } K_2O) \geq 9,0 \%$; e teores de As, Cd, Hg e Pb inferiores a 15, 10, 0,1 e 200 mg/kg, dessa maneira vários subprodutos das indústrias do ramo da mineração se enquadram, fomentando um grande mercado.

O K está presente nos solos, principalmente, em três formas distintas: I) K-estrutural, constituindo as estruturas dos minerais primários; II) K-trocável, ligado às cargas dos colóides; e III) na solução do solo. Todas essas formas estão em equilíbrio dinâmico com a solução do solo, sendo controladas por constantes de equilíbrio. Quando ocorre um desequilíbrio que diminua a atividade do íon em solução, uma fração do K presente na fase sólida é liberada na tentativa de restaurar esse equilíbrio (Medeiros et al., 2014). Dessa forma, todas as formas de K podem ser liberadas para a solução do solo, desde que haja desequilíbrio. O K presente nos remineralizadores encontra-se majoritariamente na forma estrutural em minerais primários como micas e feldspatos, portanto para liberação é necessária a dissolução desses minerais. Variadas condições de solo e da fonte de K podem interferir na dinâmica de dissolução desses minerais no solo, como atividade e força iônica da solução, acidez do solo, matéria orgânica, granulometria do material e grau de cristalinidade dos minerais (Costa et al., 2024).

Apesar de concentrações consideráveis de K em rochas, o mesmo fica indisponível as plantas até que haja a expansão das lâminas tetraédricas e octaédricas da estrutura de minerais micáceos, pois os íons K^+ ficam retidos nos poros ditrigonais da estrutura cristalina (Manning,

2010). Portanto, são rochas de baixa solubilidade em água o que se traduz em baixas taxas de liberação de K no curto prazo (Van Straaten, 2006).

Um desafio científico sobre este tema é a definição de extratores químicos para quantificação de teores disponíveis de K em solos que sofreram a aplicação de remineralizadores. A literatura é escassa neste tema em específico. Presume-se que o extrator Mehlich-1, devido sua elevada acidez ($\text{pH} \approx 1,2$), pode causar a dissolução parcial de rochas silicatadas, superestimando assim o real valor de K-disponível. Martin & Sparks (1983) apontam que o extrator Acetato de Amônio pode acessar formas não trocáveis de K, devido à similaridade dos raios hidratados do K^+ (2,8 Å) e NH_4^+ (3,0 Å).

Face ao exposto, o objetivo do trabalho foi avaliar a liberação de K ao longo do tempo, por meio de diferentes extratores de formas disponíveis, em solo incubado com Verdete ou Fonotito.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Amostras das rochas Verdete e Fonolito foram adquiridas de empresas que comercializam esses materiais como remineralizadores de solo, com posicionamento de mercado como fontes de K. Por isso, o foco deste trabalho foi avaliar a liberação de K, tendo em vista que o conhecimento desta cinética é essencial para se avaliar a viabilidade de uso desses materiais como fertilizantes.

Verdete: rocha metassedimentar, abundante no interior de Minas Gerais, na região da Serra da Saudade, nos municípios de Cedro de Abaeté, Quartel Geral, Quartel São João, Abaeté (Lima et al., 2007). A Muscovita, Illita, Feldspatos potássicos e, especialmente Glauconita destacam-se como minerais potássicos mais comuns no Verdete (Piza et al., 2010; Santos et al., 2015; Safatle, 2018). Os teores de K_2O nesta rocha também são muito variáveis, em geral situam-se entre 4 e 15 % (Loureiro et al., 2010).

Fonolito: rocha vulcânica rica em feldspatos potássicos, feldspato plagioclásio e feldspatóides, contendo entre 8 a 12% de K_2O (Teixeira et al., 2012 e 2015).

Amostras de Verdete e de Fonolito foram moídas e passadas em peneira de 0,074 mm para caracterização química, mineralógica e montagem do experimento de incubação.

2.1 Caracterização Mineralógica

A análise mineralógica foi realizada por difratometria de raios X (DRX). As amostras foram moídas até um tamanho de partícula $<0,15$ mm e colocadas em lâmina escavada. As medidas foram tomadas em difratômetro PHNalytical modelo X' PertPRO, utilizando radiação $CuK\alpha$ (1,5408 nm) com varredura de amostra na faixa de 4 a 80 graus 2θ , com intervalos de 0,02 graus 2θ a 1 passo. s^{-1} ; com tensão de 40 kV e corrente de 30 mA.

Para a identificação dos minerais a partir da dimensão “d” entre os planos atômicos, utilizou-se a fórmula de Bragg ($n\lambda = 2d \sin\theta$) e o banco de dados da American Mineralogist Crystal Structure Database (<https://rruff.geo.arizona.edu/AMS/amcsd.php>).

2.2 Caracterização morfológica, estrutural e química por Microscopia Eletrônica de Varredura

Para verificar a morfologia e composição química das rochas, amostras de Fonolito e Verdete foram moídas e peneiradas em malha 200 mesh ($<0,074$ mm) e levadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) com detector de raios-X por dispersão (EDS). O recobrimento das

amostras foi feito com Au. As leituras foram tomadas em quatro pontos com ampliação da superfície das amostras de 50 e 800 vezes.

2.3 Ensaio de Incubação

O experimento foi conduzido nas dependências do Laboratório de Análise de Solo e Tecido Vegetal (LABAS) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Para tanto, os tratamentos foram definidos por um esquema fatorial $2 \times 3 \times 3 + 1$, sendo dois remineralizadores de solo (Verdete e Fonolito), três doses de K (25, 50 e 75 mg dm⁻³), três tempos de incubação (30, 60 e 90 d), e um tratamento controle (dose 0 de K). Os tratamentos foram distribuídos em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições.

Representativo volume de amostra da camada superficial (0-30 cm) de um Latossolo Vermelho distrófico típico foi coletado na fazenda experimental do Glória (18°57'46"S 48°12'35"W) que após seca ao ar, foi passada em peneira de 2 mm para a obtenção da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA).

A unidade experimental foi composta por 1,7 kg de solo disposto em sacola plástica, onde misturou-se amostras das rochas. Após a homogeneização 'solo x rocha' adicionou-se água destilada objetivando elevar a o teor de umidade das amostras para cerca de 80% da Capacidade de Campo. Mensalmente coletaram-se cerca de 100 g de subamostra, que foi submetida a secagem para a obtenção da TFSA, e determinação dos teores de K em Mehlich-1 (HCl 0,05 mol/L+H₂SO₄ 0,025 mol/L), Acetato de Amônio (CH₃COONH₄ 1,0 mol/L pH7,0) e Cloreto de Cálcio (CaCl₂, 0,5 mol/L).

Os teores de K foram dosados por espectrofotometria de emissão de chamas (Equipamento Micronal B462).

2.4 Análise Estatística

Os dados dos teores de K foram submetidos inicialmente a análise de variância (ANOVA). O efeito de dose e tempo foi avaliado por meio de análise de regressão. Já os remineralizadores foram comparados entre si pelo teste de Scott-Knott (p=0,05).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análises mineralógicas

A composição mineralógica das rochas revela a presença de micas, feldspatos e quartzo (Figura 1). Para o Verdete, foram identificados picos característicos dos minerais Glaucionita ($(K_2(MgFe)_2Al_6(Si_4O_{10})_3(OH)_{12})$ – $d = 10,02$ e $4,54 \text{ \AA}$), Quartzo (SiO_2 – $d = 3,34$ e $4,26 \text{ \AA}$), Ortoclásio ($K(Al,Fe)Si_2O_8$ – $d = 3,31$ e $3,00 \text{ \AA}$), Microclínio ($KAlSi_3O_8$ – $d = 3,79 \text{ \AA}$) e Ilita ($(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$ – $d = 2,58 \text{ \AA}$). Outros trabalhos confirmam a presença desses minerais no Verdete (Piza et al., 2011; Santos et al., 2015). Foram analisadas sete amostras de Verdete por Piza et al. (2011), e além desses minerais foram encontradas outras micas como a Muscovita e Clorita, também constatados por Moretti (2015).

Nos dados obtidos por Safatle (2018) a interpretação dos difratogramas revelou que os padrões de difração da Sanidina e do Ortoclásio são extremamente similares, sugerindo que qualquer um desses minerais pode ser o feldspato potássico presente no Verdete, ou até mesmo que ambos coexistam. Por outro lado, as linhas de difração da Ortoclásio e da Microclina demonstram diferenças mais significativas. Apesar das discrepâncias observadas, é importante considerar a possibilidade da coexistência de ambos os minerais no Verdete, devido à semelhança notável entre as demais linhas de difração e à possibilidade de metamorfismo entre as simetrias dos cristais (Mackenzie, 1954). Além disso, a linha de difração da Anortoclásio também se assemelha consideravelmente à da Ortoclásio. Portanto, o termo 'feldspato potássico' é empregado de forma genérica na identificação da composição do Verdete *in natura*, podendo designar qualquer um dos quatro minerais pertencentes a esse grupo.

Os minerais identificados no Fonolito foram: Sanidina ($KAlSi_3O_8$ – $d = 6,51$, $4,20$ e $3,25 \text{ \AA}$), Ortoclásio ($(K(Al,Fe)Si_2O_8$ – $d = 6,51$ e $4,20 \text{ \AA}$), Microclínio ($KAlSi_3O_8$ – $d = 3,85$ e $2,93 \text{ \AA}$), Nefelina ($(K(Na,K)_3Al_4Si_4O_{16}$ – $d = 3,85$ e $3,01 \text{ \AA}$), Andesina ($(Na,Ca)(Si,Al)_4O_8$ – $d = 3,43 \text{ \AA}$) e Analcima ($Na,K Al(SiO_3)_2H_2O$ – $d = 3,43$ e $3,25 \text{ \AA}$) (Figura 1).

Os dados obtidos corroboram com os descritos por Andrade et al. (2005), destacando a presença de Ortoclásio, Nefelina (feldspatóide) e Andesina, com exceção da Egirina. Esses resultados são consistentes com os dados obtidos por Teixeira et al. (2015) por fluorescência de raios-X (FRX), que indicam uma abundância de Si, Al, K e Na na rocha, refletindo seu alto potencial fundente derivado dos feldspatos e feldspatóides presentes no Fonolito. A fórmula química da Analcima, $(Na,K[AlSi_2O_6].H_2O)$, presente no Fonolito, é baseada na miscibilidade de

K^+ e Na^+ , sendo que a Analcima natural contém aproximadamente 15 a 20 % de K, enquanto a forma mais comum é $Na[AlSi_2O_6].H_2O$ (Seryotkin; Bakakin, 2008).

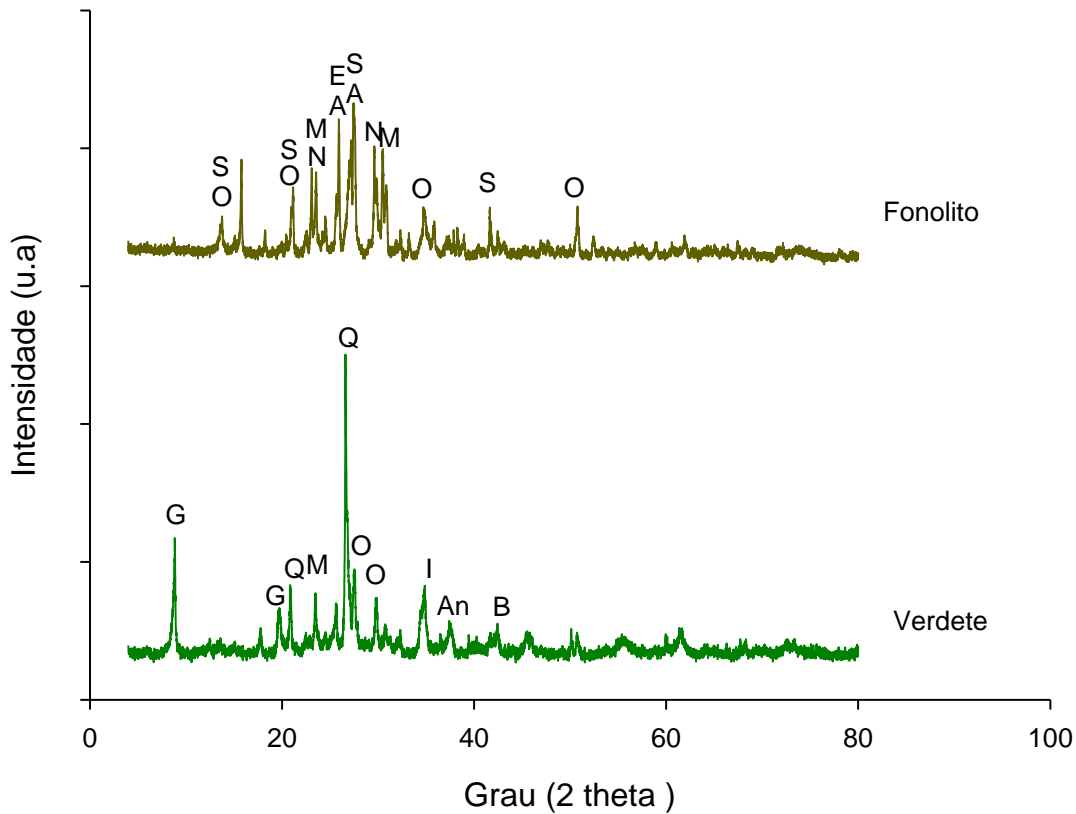


Figura 1. Difratograma de raios X de amostras de Fonolito ou Verdete (CuK α = 1,5408 nm; 4-80 °2 θ). S-Sanidina, O-Ortoclásio, M-Microclineo, N-Nefelina, E-Andesina, G-Glauconita, Q-Quartzo, I-Iilita, B-Biotita, An-Anortoclásio.

3.2 Análises químicas EDS-MEV

No Quadro 1 estão apresentadas as concentrações dos elementos químicos mais abundantes nas rochas Verdete e Fonolito. As rochas, apesar da diferença de origem geológica, apresentam concentração próxima de elementos maiores (> 1% em massa), seguindo as ordens de abundância: O, Si, Al, K, Na e Fe para o Fonolito e O, Si, K, Al, Fe e Mg para o Verdete.

Os teores de K nas rochas também foram similares, com diferença de cerca de 6%. Caracterizações química dessas rochas revelam teores de K similares aos encontrados nessas amostras (Santos et al., 2015; Loureiro et al., 2010; Piza et al., 2010; Teixeira et al., 2012, 2015).

A análise dos espectros de energia dispersiva (EDS) do Fonolito, revela que as mesmas possuem os elementos Si, Al, O, Na e K na sua composição química, que de acordo

com os dados de DRX, correspondem a presença de minerais feldspatos alcalinos (Microclínio, Ortoclásio, Sanidina) e Nefelina.

A predominância de Si e Al nas rochas sugere que seja essencialmente composto por aluminossilicatos, uma suposição que pode ser confirmada pelos resultados da DRX. Nesses resultados, a origem dos picos de difração do Verdete é explicada pela presença de planos cristalinos presentes em Feldspatos potássicos, Muscovita e Quartzo.

O K está localizado nas entrecamadas desses minerais, assumindo uma natureza estrutural, o que implica que não está prontamente disponível para a absorção pelas plantas e requer um processo prolongado de intemperismo para sua liberação. Tanto no Fonolito quanto no Verdete, a presença de Fe foi detectada; entretanto, no Verdete, também foi identificou-se Mg, sugerindo a presença de minerais ferromagnesianos, como a Glauconita, concordando com os resultados de DRX.

Quadro 1. Concentração de alguns elementos químicos em amostras de Fonolito e Verdete

Elemento	Fonolito	Verdete
	-----%, m/m-----	
O*	49,49	46,48
Na	4,88	N/I
Al	10,92	6,22
Si	22,63	18,22
Cl	0,07	N/I
K	7,11	6,77
Ca	0,86	N/I
Ti	0,26	0,33
Mn	0,13	0,09
Fe	2,28	4,31
Mg	N/I	1,63

*medição realizada por Espectroscopia de Energia dispersiva de raios-X (EDS) integrada ao Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). N/I – não identificado.

3.3 Liberação de K

A análise de variância (ANOVA) dos dados revelou efeito significativo de Remineralizador, Tempo e Dose nos teores de K para os diferentes extratores (Quadro 2). As significâncias foram maiores para o extrator CaCl_2 .

Como a ANOVA é conclusiva para tratamentos cujo Grau de Liberdade é igual a 1, conclui-se que independente da dose e do tempo de incubação, os teores de K nos diferentes extratores foi maior quando a rocha foi o Fonolito. De fato, comparando-se os teores de K em

M-1, AcHN_4 e CaCl_2 observou-se que em média foram 22, 20 e 25 %, maiores para o Fonolito, respectivamente.

A presença de minerais ricos em Na (como Andesina e Analcima) no Fonolito, uma rocha ígnea de composição máfica, facilita sua solubilização. Conforme observado por Gudbrandsson et al. (2011) em experimentos com Basalto, a dissolução em condições alcalinas prioriza a liberação de elementos presentes nos Plagioclásios, como Ca e Al, antes do K, devido à maior resistência dos Feldspatos potássicos ao intemperismo em comparação com os Plagioclásios, condizente com a Série de Goldich (1938). De acordo com Manning (2011), rochas que possuem Nefelina liberam K mais facilmente que rochas compostas apenas por Feldspatos potássicos. Por sua vez, Sak et al. (2004) identificaram que em camadas de alteração do Basalto, a mobilidade dos cátions segue a ordem: $\text{Ca} \approx \text{Na} > \text{K} \approx \text{Mg} > \text{Si} > \text{Al} >> \text{Fe} \approx \text{P}$.

Medeiros et al. (2014), ao analisarem diferentes formas de K em solos do Estado da Paraíba, utilizaram o CaCl_2 na concentração $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ e observaram maior extração, pontuando um possível acesso do cátion Ca^{2+} e talvez extraíndo uma pequena fração de K trocável, uma hipótese seria uma extração ainda maior neste trabalho pois foi utilizado uma solução mais concentrada do sal.

A discrepância entre os métodos de extração usando Acetato de Amônio e Mehlich-1 foi mencionada por Rezende (2022) em seu estudo sobre a liberação de K a partir de Micaxisto. No entanto, neste trabalho, a disparidade não foi tão marcante quanto a descrita anteriormente, o que reforça a hipótese de Martins & Sparks (1983). De acordo com essa hipótese, seguindo a dinâmica do K no solo, após sua liberação com a dissolução de minerais primários ou secundários, o elemento tende a ocupar predominantemente as cargas negativas do solo. Assim, a taxa de dissolução desses minerais pode ser estimada pelo ΔK trocável, um indicador que tem se mostrado confiável. No entanto, devido à grande semelhança entre os raios hidratados do K^+ ($2,8 \text{ \AA}$) e do NH_4^+ ($3,0 \text{ \AA}$), o Acetato de Amônio pode acessar formas de K não trocáveis.

Quadro 2. Análise de Variância considerando os teores de K nos extratores Méhlich-1, Acetato de Amônio e Cloreto de Cálcio em função da incubação de amostras de Verdete ou Fonolito em diferentes doses e tempos.

FV	GL	QM		
		K- Mehlich-1	K - NH ₄ CH ₃ CO ₂	K-CaCl ₂
Tempo (d)	2	51,05**	68,95**	114,38***
Remineralizador	1	376,57***	190,29***	297,44***
Dose (mg/dm ³)	3	54,82***	27,42*	52,67***
T*D*R	6	5,57	11,17	6,42
Erro	59	7,90	7,70	8,46
Total	71		71	
CV (%)	12,27		15,46	

*, **, *** significativo a 5, 1 e 0,1 % pelo teste “F”.

Independentemente de as interações triplas não terem sido significativas não significativas pelo teste “F”, decidiu-se realizar os desdobramentos, pois assume-se que quando não há significância não significa que todas as interações foram não significativas.

Encontra-se no Quadro 3 as equações de regressão ajustadas para o desdobramento-efeito de dose nos teores de K por diferentes extratores e tempos de incubação. No Quadro 4 estão representadas as médias, pois não houve significância, para o desdobramento-efeito de tempo nos teores de K por diferentes extratores e doses.

Para as doses empregadas, não se observou significância estatística em relação ao tempo e ao remineralizador Verdete. Martins et al. (2015) obtiveram resultados similares ao do presente trabalho ao avaliar o Verdete *in natura*, aplicando doses elevadas de K₂O. A rocha apresenta uma baixa concentração de K solúvel em água e ácido cítrico (2%), o que sugere uma restrição no uso exclusivo do remineralizador na forma moída como fonte de K, especialmente em culturas anuais (Santos et al., 2015).

No caso do Fonolito (Quadro 3), as doses demonstraram significância estatística próxima a 1% em todos os extratores e períodos de tempo, exceto para o AcNH₄ nos períodos de 30 e 60 d. Augusto et al. (2021) observaram um aumento linear na disponibilidade de K no solo conforme a dose aumentava. Na maior dose aplicada (200 mg kg⁻¹), o aumento na disponibilidade de K ao Fonolito, em comparação com o tratamento controle, foi de cerca de 49%. Em contraste, o aumento com o uso de uma fonte solúvel foi de 447%. Essa disparidade é atribuída à baixa solubilidade do Fonolito em água ou em ácido cítrico (1% do total de K₂O).

Diversas abordagens têm sido exploradas para promover dissolução desses materiais, no entanto, os principais métodos incluem tratamentos térmicos, químicos ou biológicos, os quais são dispendiosos, inviabilizando a produção de fertilizantes em larga escala (Valarelli; Guardani, 1981; Mazumder et al., 1993; Santos, 2012, 2015; Matias et al., 2019).

Notavelmente, o extrator M-1 apresentou o maior R^2 , entretanto, é importante ressaltar que isso não implica necessariamente uma representação mais exata da realidade, pois ainda há escassez de dados robustos sobre a liberação de K de Remineralizadores, e a literatura destaca a possibilidade de o extrator M-1 acessar o K estrutural das rochas, o que pode resultar em uma superestimação da estimativa de liberação considerando este extrator.

Quadro 3 - Análise de regressão para o desdobramento de dose dentro de cada nível de tempo e remineralizador

Tempo (d)	Fonolito	
	Mehlich-1	Verdete
30	$\hat{y} = 21,28 + 0,1043^{**}x$	$R^2 = 0,97$ $\hat{y} = y = 20,73$
60	$\hat{y} = 21,48 + 0,1400^{**}x$	$R^2 = 0,97$ $\hat{y} = y = 21,96$
90	$\hat{y} = 19,84 + 0,1015^{**}x$	$R^2 = 0,99$ $\hat{y} = y = 19,19$
-----AcNH ₄ -----		
30	$\hat{y} = y = 21,34$	$\hat{y} = y = 17,86$
60	$\hat{y} = 14,86 + 0,0978^{**}x$	$R^2 = 0,86$ $\hat{y} = y = 17,20$
90	$\hat{y} = y = 18,69$	$\hat{y} = y = 13,90$
-----CaCl ₂ -----		
30	$\hat{y} = 15,53 + 0,1029^{**}x$	$R^2 = 0,94$ $\hat{y} = y = 16,50$
60	$\hat{y} = 14,79 + 0,1002^{**}x$	$R^2 = 0,59$ $\hat{y} = y = 14,48$
90	$\hat{y} = 19,26 + 0,1029^{**}x$	$R^2 = 0,84$ $\hat{y} = y = 18,38$

*, **, *** significativo a 5, 1 e 0,1 % pelo teste "Skot-Knott"; \hat{y} , média observada; y, média estimada.

Quadro 4 - Análise de regressão para o desdobramento do tempo dentro de cada nível de dose e remineralizador

Dose (mg dm ⁻³)	Fonolito	
	Mehlich-1	Verdete
0	$\hat{y} = y = 20,40$	$\hat{y} = y = 20,73$
25	$\hat{y} = y = 24,27$	$\hat{y} = y = 29,54$
50	$\hat{y} = y = 21,76$	$\hat{y} = y = 19,70$
75	$\hat{y} = y = 20,16$	$\hat{y} = y = 20,84$
	-----AcNH ₄ -----	
0	$\hat{y} = y = 17,37$	$\hat{y} = y = 19,13$
25	$\hat{y} = y = 19,35$	$\hat{y} = y = 22,43$
50	$\hat{y} = y = 17,15$	$\hat{y} = y = 15,83$
75	$\hat{y} = y = 15,17$	$\hat{y} = y = 17,15$
	-----CaCl ₂ -----	
0	$\hat{y} = y = 15,67$	$\hat{y} = y = 20,86$
25	$\hat{y} = y = 20,63$	$\hat{y} = y = 24,25$
50	$\hat{y} = y = 16,57$	$\hat{y} = y = 16,12$
75	$\hat{y} = y = 16,13$	$\hat{y} = y = 16,35$

*, **, *** significativo a 5, 1 e 0,1 % pelo teste "Skot-Knott"; \hat{y} , média observada; y, média estimada.

4. CONCLUSÃO

Os principais minerais presentes nas rochas foram Glauconita, Quartzo e Ortoclásio para o Verdete e Ortoclásio e Sanidina para o Fonolito.

Os elementos maiores (> 1%) em ordem de abundância são O, Si, K, Al, Fe e Mg para o Verdete e O, Si, Al, K, Na e Fe para o Fonolito.

A solubilidade do Fonolito para K, nos extratores Mehlich-1, AcNH_4 e CaCl_2 é maior que a rocha Verdete. Esse diagnóstico foi obtido pelo contraste entre as rochas quanto aos teores médios de K nos diferentes extratores e pelo efeito significativo de dose para a maioria dos tratamentos com o Fonolito, e não observados para o Verdete.

O efeito de dose nos teores de K em CaCl_2 sugere que a rocha Fonolito é mais efetiva que o Verdete na liberação de K dentro de três meses de aplicação no solo. Entretanto, estudos envolvendo plantas serão necessários para uma constatação mais exata da biodisponibilidade de K.

Estudo do efeito de tempos superiores a 90 d serão essenciais para melhor compreensão da cinética de liberação de K de remineralizadores em diferentes tipos de solo.

Agradecimentos

À FAPEMIG pela aprovação do projeto guarda-chuva “*Eficiência química e econômica de Remineralizadores de solo comercializados em Minas Gerais*” Processo: APQ-01968-23; Chamada Universal 001/2023.

5. REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Mineração (ANM). Potássio. Disponível em: https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=4004#:~:text=A%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20pot%C3%A1ssio%20no,Vale%20do%20Rio%20Doce%20FVALE. Acesso em: 22 nov. 2023.

American Mineralogist Crystal Structure Database. Disponível em: <https://ruff.geo.arizona.edu/AMS/amcsd.php>. Acesso em: 10 fev. 2024.

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>.

Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA). Estatísticas. Disponível em: <http://anda.org.br>. Acesso em: 22 nov. 2023.

AUGUSTO, C. et al. Efficiency of phonolite as a potassium source for Paiaguás palisadegrass. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 51, 1 jan. 2021.

BACHIÃO, C. et al. Desenvolvimento de *Urochloa brizantha* adubada com fonolito e inoculada com bactérias diazotróficas solubilizadoras de potássio. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 41, n. 3, p. 625–632, 1 jul. 2018.

BRASIL, 2016. MAPA IN 05/2016. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa SDA N.º 05 de 10 de março de 2016. Dispõe sobre os critérios e protocolos em remineralizadores e substratos para as plantas, destinados à agricultura. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 14 de março de 2016. Seção 1, p.10-11.

BRASIL. Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 11 dez. 2013. Seção 1, p. 1. Acesso em: 22 nov. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano Nacional de Fertilizantes: Estatísticas do Setor. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/estatisticas-do-setor>. Acesso em: 21 nov. 2023.

BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. Estudos Estratégicos – Fertilizantes. Disponível em: https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf. Acesso em: 21 nov. 2023.

COSTA JÚNIOR, A. DA et al. Glauconite as a potential source of potassium in Brazilian agriculture - a review. *Revista Ciência Agronômica*, v. 55, p. e20238828, 29 mar. 2024.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Solos do Brasil. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>. Acesso em: 21 nov. 2023.

GUDBRANDSSON, S. et al. An experimental study of crystalline basalt dissolution from $2 \leq \text{pH} \leq 11$ and temperatures from 5 to 75°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 75, n. 19, p. 5496–5509, out. 2011.

Instituto da Potassa & Fosfato. 1998. Manual internacional de fertilidade do solo, 2a ed. Piracicaba, POTAFOS. 177p.

LIMA, O. N. B.; UHLEIN, A.; BRITO, W. Estratigrafia do Grupo Bambuí na Serra da Saudade e geologia do depósito fosfático de Cedro do Abaeté, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, n. 4, p. 204-215, 2007. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.200737S4204215>.

MACKENZIE, W. S. The orthoclase-microcline inversion. *Mineralogical Magazine and Journal of the Mineralogical Society*, v. 30, n. 225, p. 354-366, 1954.

MANNING, D.A.C. 2010. Mineral source of potassium for plant nutrition; a review. *Agon Sust Develop* 30:22-294.

MARTINS, V. et al. Effect of alternative multinutrient sources on soil chemical properties. v. 39, n. 1, p. 194–204, 1 fev. 2015.

MATIAS, P. C. et al. 2019. Solubilization of a K-silicate rock by *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Minerals Engineering*, 132, 69-75.

MAZUMDER, A. K.; SHARMA, T.; RAO, T. C. 1993. Extraction of potassium from glauconitic sandstone by the roast-leach method. *Int. J. Miner. Process.*, 38:111-123.

MEDEIROS, J. S. et al. Formas de potássio em solos representativos do Estado da Paraíba. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 45, n. 2, p.417-426, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000200025>

MORETTI, B. S. Caracterização mineralógica, química e solubilização do potássio de glauconita modificada. *repositorio.ufla.br*, 6 jun. 2016.

PIZA, P. A. T. et al. Verdete da região de Cedro de Abaeté (MG) como fonte alternativa para potássio. *Geosciences*, v. 30, n. 3, p. 345-356, 2011.

PIZA, P. A. T et al. Caracterização mineralógica de fontes alternativas para potássio. 2010.

REZENDE, F. H. S. Liberação de potássio a partir de micaxisto moído aplicado em solos do cerrado. 2022.

SAFATLE, F. A. Solubilização de potássio durante lixiviação ácida e básica de siltitos verdes em reatores pressurizados. 2018. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós- Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SAK, P. B. et al. Rates of weathering rind formation on Costa Rican basalt 1 Associate editor: E. H. Oelkers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 68, n. 7, p. 1453–1472, 1 abr. 2004.

SANTOS, W. O. et al. 2015. Thermal and chemical solubilization of verdete for use as potassium fertilizer. *International Journal of Mineral Processing*, 140, 72-78.

SANTOS, W. O. Solubilização e concentração de potássio do verdete por meio de tratamentos físicos, químicos e biológicos. 2012. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012. 76p.

SERYOTKIN, Y. V.; BAKAKIN, V. V. The thermal behavior of secondary analcime as leucite derivate and its structural interpretation. *Russian Geology and Geophysics*, v. 49, n. 3, p.153–158, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.014>.

SILVA, M. A. M. DA; SCHREIBER, B. C.; SANTOS, C. L. Evaporitos como recursos minerais. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 18, n. 3, p. 338–350, 2000.

TEIXEIRA, A. M. S. et al. Estudo do comportamento térmico da rocha fonolito com fins á produção de fertilizantes. *HOLOS*, v. 5, p. 52–64, 2015.

TEIXEIRA, A. M. S. et al. Estudo do comportamento térmico da rocha fonolito com fins à produção de fertilizantes. *HOLOS*, vol. 5, 2015, pp. 52-64

TEIXEIRA, A.M.S. et al. Technological characterization of phonolite rock to be applied as source of nutrients to the brazilian agriculture. in *EPD Congress 2011* (eds S. N. Monteiro, D. E. Verhulst, P. N. Anyalebechi and J. A. Pomykala), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. 2011. v. 1. p. 81-86. doi: 10.1002/9781118495285.ch10

VALARELLI, J. V.; GUARDANI, R. Estudos experimentais para utilização das rochas potássicas de Poços de Caldas como fertilizantes. *Fertilizantes*, 3:4-7, 1981.