

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRARIAS
CURSO DE AGRONOMIA

GIOVANNA DOS SANTOS ROCHA

EXTRATORES DE POTÁSSIO EM FONTES ALTERNATIVAS

UBERLÂNDIA- MG
2025

EXTRATORES DE POTÁSSIO EM FONTES ALTERNATIVAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de agronomia da UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.

Uberlândia – MG, 10 de outubro de 2025.

Banca de avaliação:

Prof. Dr. Hamilton Seron Pereira
Orientador

João George Moreira
Membro da banca

Marcos Vinicius Rodrigues
Membro da banca

UBERLÂNDIA-MG
2025

RESUMO

Com o objetivo de avaliar e desenvolver novos métodos para determinar a solubilidade do potássio em fontes alternativas, foi conduzido um experimento com a cultura do milho em casa de vegetação, utilizando amostras de dois tipos de solos, Latossolo Vermelho distrófico e o Neossolo Quartzarênico órtico típico, utilizando 12 rochas moídas ricas em potássio nas doses de 600 mg de K₂O dm⁻³ de solo. Para comparação haverá um tratamento com KCl como fertilizante padrão e uma testemunha absoluta sem adição de potássio. Os demais nutrientes foram fornecidos em quantidades suficientes para atender a necessidade da cultura. O experimento foi conduzido em um delineamento inteiramente casualizados com 13 tratamentos, e os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste Scott-Knot a 0,05 de significância. As fontes usadas nestes experimentos foram analisadas pelos seguintes métodos de extração: água (método oficial); solução de ácido cítrico a 2% e citrato neutro de amônio CNA; solução de ácido cítrico a 2% + fluoreto de amônio 0,5%, solução de ácido tartárico a 5% e solução de ácido tartárico a 5% + fluoreto de sódio 0,5% (novos métodos propostos). As variáveis analisadas ao final do experimento em vaso foram: potássio extraído do solo após o cultivo, silício no solo, matéria seca da parte aérea do milho, concentração e acúmulo de cálcio, magnésio e potássio no tecido foliar. A extração de K pelas plantas foram correlacionadas com a recuperação de K obtida em cada método de análise. O método com melhor correlação será proposto para a avaliação de fontes insolúveis de K foi o Ácido Cítrico+ Fluoreto de Amônio, seguido pelo CNA.

Palavras-chave: Métodos de análise, Remineralizadores, *Pennisetum glaucum*

ABSTRACT

To evaluate and develop new methods for determining potassium solubility in alternative fertilizer sources, a greenhouse experiment was conducted using pearl millet grown in two soil types: a Dystrophic Red Oxisol (Latossolo Vermelho distrófico) and a Typic Orthic Quartzipsamment (Neossolo Quartzarênico órtico típico). Twelve ground potassium-rich rock materials were applied at a rate equivalent to 600 mg K₂O dm⁻³ of soil. For comparison, a treatment with potassium chloride (KCl) as the standard fertilizer and an absolute control without potassium addition were included. All other nutrients were supplied in sufficient amounts to meet the crop requirements. The experiment was arranged in a completely randomized design with 13 treatments. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA), and treatment means were compared using the Scott-Knott test at the 5% significance level. The fertilizer sources were analyzed using the following extraction methods: water (official method); 2% citric acid solution; neutral ammonium citrate (NAC); 2% citric acid + 0.5% ammonium fluoride solution; 5% tartaric acid solution; and 5% tartaric acid + 0.5% sodium fluoride solution (newly proposed methods). At the end of the pot experiment, the following variables were evaluated: soil-extractable potassium after cultivation, soil silicon content, pearl millet shoot dry matter, and the concentration and accumulation of calcium, magnesium, and potassium in plant tissue. Potassium uptake by the plants was correlated with the potassium recovery obtained by each analytical method. Among the evaluated extraction methods, the 2% citric acid + 0.5% ammonium fluoride solution showed the strongest correlation with plant potassium uptake and was therefore identified as the most suitable method for assessing insoluble potassium sources, followed by the neutral ammonium citrate (NAC) method.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	8
3.MATERIAL E MÉTODOS	26
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5.CONCLUSÃO.....	27
6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a agricultura enfrenta o desafio de manter altos níveis de produtividade enquanto minimiza os impactos ambientais e promove a sustentabilidade e bom uso dos recursos naturais. Sendo assim, o uso de fontes alternativas de nutrientes, como os remineralizadores, se mostram promissores, devido ao seu potencial de suprir, ou pelo menos, contribuir nos elementos essenciais ao desenvolvimento das culturas de forma mais sustentável e econômica. No que diz respeito aos macronutrientes, o potássio é aquele mais exigido, por ser o mais extraído pelas plantas, em termos quantitativos (Marschner, 1995).

Segundo o Conselho Nacional de Fertilizantes (Confert), o Brasil importa cerca de 95% do potássio que consome, evidenciando uma forte dependência do mercado externo. Diante desse cenário, em 2022, a Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos da Presidência da República lançou o Plano Nacional de Fertilizantes 2050 (PNF 2050), com o objetivo de estimular a produção nacional desse insumo estratégico. Tendo como meta, até 2050, a produção interna de potássio seja capaz de suprir entre 45% e 50% da demanda interna.

Nesse contexto, a busca por fontes alternativas de potássio disponíveis no território nacional torna-se essencial para alcançar as metas do PNF 2050 e reduzir a vulnerabilidade externa. De acordo com o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), o país possui um amplo potencial para a exploração de rochas potássicas, com destaque para depósitos de fonolito, verdete, glauconita e sienitos nefelínicos, distribuídos principalmente nos estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia e Ceará (CPRM, 2021). Essas rochas podem ser utilizadas como remineralizadores, liberando potássio gradualmente no solo e contribuindo para a nutrição das plantas de forma mais sustentável. Além de serem alternativas viáveis para substituição parcial dos fertilizantes solúveis convencionais, os remineralizadores também promovem benefícios adicionais ao solo, como a melhoria da estrutura, da retenção de água e da atividade microbiana.

Apesar do crescente interesse nos remineralizadores como fontes de potássio, e da sua regulamentação, os critérios de definição da qualidade ainda apresenta alguns desafios, há poucos estudos focados na quantidade mínima de nutrientes que devem ser liberados em certo período e correlacioná-los com a produtividade (Ribeiro, 2017). Huang & Keller (1970), Ramos (2014) e Azevedo (2014) testaram ácidos orgânicos com baixo peso molecular associado a

diversas concentrações a fim de analisar a solubilidade de minerais nas rochas, como forma de mimetizar as reações que ocorrem naturalmente no solo. Portanto, a criação e validação de novos métodos de extração que simulem melhor os processos de liberação de nutrientes no solo são cruciais para determinar a viabilidade dessas fontes alternativas.

Neste contexto, esse trabalho, objetivou avaliar métodos para determinar a solubilidade do potássio em diferentes fontes alternativas, utilizando o milheto (*Pennisetum glaucum*) como extrator natural, em casa de vegetação. Amostras de dois solos contrastantes, um Latossolo Vermelho distrófico e um Neossolo Quartzarênico. O experimento visou contribuir para o desenvolvimento de ferramentas analíticas mais precisas e adaptadas às necessidades da agricultura sustentável.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Ao classificar os nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal, o potássio é caracterizado como um macronutriente, sendo absorvido na forma de K^+ (cátion) (Malavolta, 1980, 2006), sendo o íon em maior quantidade e permeabilidade nas células vegetais (Taiz e Zeiger, 2009). Se fornecido em excesso, pode causar interferência na absorção de outros cátions (Meurer, 2006; Prado, 2008). Tem alta mobilidade, transloca-se de tecidos mais velhos para os mais recentes, sendo que pelo floema transporta a sacarose das folhas para a raiz, e pelo xilema pelo transporte de água.

Dentre tantas de suas funcionalidades, a principal é como ativador enzimático, estando relacionado com o funcionamento de mais de 60 enzimas, afetando diretamente a respiração celular e fotossíntese (Prado, 2008; Taiz & Zeiger, 2009). Além disso, é responsável pela movimentação dos estômatos, crescimento radicular e evita a criação de espécies reativas de oxigênio (Bang et al., 2020).

Portanto, o uso de fertilizantes para suprir as necessidades nutricionais das culturas se faz necessário, para manter o alto padrão produtivo. O Brasil é quarto maior consumidor de fertilizantes no mundo, sendo o maior importador de potássio, especificamente. Sendo a soja a cultura mais demandada.

Atualmente, o Brasil é responsável por cerca de 8% do consumo global de fertilizantes, sendo o quarto país do mundo, atrás apenas de China, Índia e Estados Unidos. A velocidade de crescimento da demanda brasileira tem superado o crescimento da oferta nacional e seu atendimento tem ocorrido via aumento de importações. O país deixou de ser exportador de fertilizantes para ser grande importador entre 1992 e 2020. (estudo estratégico)

Em 2024, foram exportados 44,3 milhões de toneladas de fertilizantes pelo Brasil, batendo o recorde. Apresentando um crescimento de 8,3% ao comparar com a mesma data do ano anterior, de acordo com a edição de janeiro do Boletim Logístico, divulgado pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab).

A tendência é que a dependência do mercado externa fique mais intensa com o passar do tempo, visto que se espera que o Brasil será responsável por quase metade da produção mundial de alimentos nos próximos anos, exigindo maior demanda de fertilizantes. A maior parte do custo de produção está relacionada ao preço dos fertilizantes importados, os aumentos

dos mesmos afetam negativamente a balança comercial brasileira, deixando nossos produtos menos competitivos.

Os altos custos desses produtos importados juntamente com os problemas associados a sua alta solubilidade, têm trazido a necessidade de explorar novas fontes, que sejam eficientes e de origem nacional. Estes seriam os mais apropriados para as condições de solo tropical, altamente intemperizados, pois, devido a sua lenta dissolução, as perdas por lixiviação são reduzidas (Baligar et al., 2001), (Manning, 2010), (Jimenez Gómez, 1992).

Dessa forma, os remineralizadores tem se mostrado promissores, uma vez que podem agir na correção da acidez, condicionamento do solo e fornecimento de nutrientes (Luz et al., 2010), Lápido-Loureiro, 2004; Van Straaten, 2006; Martins et al., 2010). O principal ponto negativo desses produtos é a sua baixa solubilidade, que, no entanto, se aplicada ao manejo apropriado, pode ser favorável ao cultivo, visto que, em regiões com alta índice pluviométrico associado a baixa capacidade de troca de cátions faz com que fontes convencionais tenha alta lixiviação (Leonardos et al. (2000).

Os remineralizadores apresentam diversas vantagens para o solo e as plantas, e efeitos residuais longos promovem a reorganização do solo ao longo do tempo. Esse recurso permite a liberação gradual de nutrientes, reduzindo sua lixiviação, contribuindo para um aumento nas bases de potássio, magnésio e cálcio (K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}). Além disso, esses insumos ajudam a controlar a toxicidade do alumínio (Al^{3+}), a regulação do pH e a manutenção da microbiota do solo. Portanto, a combinação de remineralizador e fertilizante solúvel pode fornecer vantagens no custo-benefício (Galina; Baretta, 2023).

A pesquisa sobre o uso de remineralizadores na agricultura está concentrada tanto na sua função como fonte nutricional quanto em condicionador de solo. No Brasil, o uso desses materiais em 10 de dezembro de 2013 foi institucionalizado pela Lei nº 12.890, que foi classificada como "remineralizadores". O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) definiu diretrizes para seu uso por meio da Instrução Normativa (IN) nº 5 (BRASIL, 2016), a qual define os padrões e especificações regulatórias.

De acordo com esse regulamento, os remineralizadores devem atender aos requisitos de composição mínima, ao menos 1% de óxido de potássio (K_2O) e a soma de base igual ou superior a 9% do peso total. Além disso, existe um limite para a presença de silício (SiO_2), e

seu conteúdo não pode exceder 25% da rocha bruta e na fração disponível. A normativa também apresenta restrições estritas à presença de elementos potencialmente tóxicos que possam causar danos a segurança ambiental ou a saúde dos solos agrícolas (Coelho, 2016).

A solubilidade é normalmente usada como parâmetro para avaliar a eficácia de remineralizadores, pois está diretamente associada à sua reatividade química e ao potencial de disponibilizar nutrientes para as plantas. De acordo com a FAO (2004), a solubilidade em soluções extratoras como citrato neutro de amônio (CNA), ácido cítrico a 2% e ácido fórmico a 2% é frequentemente adotada como forma de mensurar a liberação potencial de nutrientes. Esses testes químicos permitem comparar diferentes fontes minerais e inferir sua eficiência agronômica, ainda que não representem integralmente o que ocorre no solo, onde a dinâmica da solução, pH, textura e biota também exercem influência significativa.

Os métodos de extração utilizados para medir a solubilidade dos remineralizadores são fundamentais para caracterizar sua eficiência potencial, mas apresentam limitações. O estudo de Rajan et al. (1996) destaca que extratores como CNA e ácido cítrico podem fornecer resultados contrastantes dependendo da composição mineralógica da rocha e das condições de análise, o que reforça a necessidade de padronização metodológica. Além disso, a granulometria da rocha, o tempo de contato e a relação sólido:líquido podem influenciar significativamente os resultados (FAO, 2004). Assim, o desenvolvimento de novos métodos de avaliação deve considerar tais variáveis, de forma a aproximar os testes laboratoriais da realidade do campo.

No caso específico das fontes alternativas de potássio, ganha ainda maior relevância, pois o Brasil depende fortemente da importação de fertilizantes altamente solúveis, como o cloreto de potássio. Logo, avaliar a solubilidade de rochas potássicas nacionais permite identificar seu potencial uso agrícola e estimar sua contribuição no médio e longo prazo para a nutrição vegetal. Segundo BMSolo (2023), apesar da solubilidade reduzida em água, os remineralizadores potássicos liberam gradualmente K^+ no solo, o que garante menor risco de perdas e pode representar uma alternativa sustentável frente às fontes importadas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Avaliação da eficiência agronômica

O experimento foi realizado na casa de vegetação do Campus Gloria, da Universidade Federal de Uberlândia, no município de Uberlândia–MG. Sendo os solos utilizados coletados no mesmo município. Escolheu-se um Latossolo vermelho distrófico típico (LVdt) e um Neossolo Quartzarênico Órtico Típico (RQo), estes foram submetidos a análises físicas e químicas conforme tabelas 1 a 3. O experimento foi desenvolvido em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial (2×13), sendo uma testemunha e 12 fontes de potássio, todas em pó (Tabela 3), com quatro repetições por tratamento, testados nos dois solos.

Após caracterização, os solos foram peneirados e adicionados aos vasos ($10 \text{ dm}^3 \text{ vaso}^{-1}$). Realizou-se correção do pH e ajuste de saturação por bases pela adição de calcário (Imagem 1 e 2). Os tratamentos a serem testados foram adicionados aos solos, as doses foram definidas em função do teor total de K para fornecer, 600 mg dm^{-3} de K_2O , detalhados na Tabela 3.



Imagem 1. Instalação do experimento.



Imagem 2. Instalação do experimento.

Aos 30 dias depois, semeou-se 20 sementes de milho em cada vaso, também foi adubado $5,35 \text{ g vaso}^{-1}$ de MAP. Passados 10 dias da semeadura foi feito o desbaste, deixando cada vaso com dez plantas. No décimo 18 dia realizou-se adubação nitrogenada, na dose de $5,4 \text{ g vaso}^{-1}$ de Ureia. Além disso, a adubação de micronutrientes era garantida quinzenalmente, com uma solução via solo fornecendo Boro ($0,81 \text{ g dm}^{-3}$), Manganês ($3,66 \text{ g dm}^{-3}$), Zinco ($0,15 \text{ g}$

dm⁻³), Molibdênio (0,15g dm⁻³) e Cobre (1,3g dm⁻³). Realizou-se também o suprimento devido de água, ao longo de todo cultivo.

. **Tabela 1.** Caracterização física do solo utilizado neste experimento.

Solos	Areia Total	Silte	Argila
	-----g kg ⁻¹ -----		
LVdt – Latossolo Vermelho Distrófico Típico	358	292	350
RQo – Neossolo Quartzarênico Órtico Típico	840	52	108

Tabela 2. Caracterização química dos solos utilizados neste experimento.

Solo	Ph	P	K	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H + Al	T	MO
	-- CaCl ₂ --	--mg dm ⁻³ --			----- cmol _c dm ⁻³ -----				-- g kg ⁻¹ --
LVdt	7,4	5,20	130,2	0,0	2,75	1,78	1,32	5,59	1,23
RQo	6,7	1,47	56,9	0,0	1,71	0,12	0,53	2,51	0,86

pH: CaCl₂; P e K: Mehlich-1 (HCl 0,05 L⁻¹ + H₂SO₄ 0,025 1 mol L⁻¹); Ca, Mg e Al: KCl 1 mol L⁻¹; H+Al: Solução Tampão SMP a pH 7; T: CTC a pH 7,0; MO: Método colorimétrico; (SILVA, 2009).

Tabela 3. Caracterização química das fontes utilizadas (Resultados LAFER).

Tratamento	Fonte	K ₂ O Total %
1	Glauconita de Goiás	5,81
2	Verdete	9,21
3	Termofosfato Magnésiano	7,00
4	Termopotássio	7,88
5	Fonolito Hidrotermalizado	13,15
6	Kamafugito	4,42
7	Fonolito	8,5
8	Resíduo de verdete	3,46
9	Glauconita	4,61
10	Sulfato de Potássio	52,4
11	KCl	60,0
12	Testemunha	0

* Extração com HNO₃ + HF

O milho foi colhido entre 35 dias após a emergência das plântulas (Imagens 3 e 4). Imediatamente após a coleta, o material vegetal foi submetido à secagem em estufa com circulação de ar a 65°C até a obtenção de peso constante. Para as análises químicas, as folhas secas foram processadas em moinho, para determinação dos teores de Potássio.

Paralelamente, amostras de solo foram coletadas de cada vaso após a remoção da matéria vegetal fresca. Estas foram analisadas para determinação de Potássio conforme protocolos analíticos estabelecidos pela EMBRAPA (1999)



Imagem 3. Milheto 35 dias após emergência.



Imagem 4. Coleta de material vegetal e solo.

3.2 Determinação de Potássio Solúvel

3.2.1 Preparo das amostras

Primeiramente todas as amostras de fertilizantes granulados, foram moídas manualmente com uso de almofariz e pistilo, até que 100% passe na peneira de 50 mesh. Após serem moídas as amostras devem ser colocadas em estufa a 105°C até atingirem peso constante. Posteriormente, foram pesados 0,1 grama dos fertilizantes e transferidos para um béquer de 100 mL.

3.2.2 Soluções Extratoras de K testadas

- - **Água**
- - **Solução de ácido cítrico a 2%:** Para preparar o Ácido cítrico a 2% necessitou-se 2 g de ácido cítrico para 100 ml de água destilada.
- - **Solução de ácido cítrico a 2% + fluoreto de amônio 0,5%:** Para preparar a solução necessitou-se de 2 g de ácido cítrico e 0,5 g de fluoreto de amônio para 100 mL de água destilada.

- - **Solução de ácido tartárico a 5%:** Para preparar o Ácido tartárico a 5% necessitou-se 5 g de ácido tartárico para 100 ml de água destilada.
- - **Solução de ácido tartárico a 5% + fluoreto de sódio 0,5%:** Para preparar esta solução utilizou-se 5 g de ácido tartárico e 0,5 g de fluoreto de amônio para 100 mL de água destilada.
- **Citrato neutro de amônio (CNA):** Foi dissolvido 370g de ácido cítrico mono hidratado cristalizado, $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$, em 1500 ml de água destilada e adicionar 345 ml de hidróxido de amônio, NH_4OH , p.a., com 28 a 29% de NH_3 . Esfriar e medir o pH. Ajustar o pH para 7,0 com hidróxido de amônio 1+9 ou com solução de ácido cítrico a 100 g L^{-1} .

3.2.3 Extração

Foi adicionado 50 ml da solução extratora as alíquotas. A mistura foi levada à chapa aquecedora, tampada com vidro relógio e aquecida até atingir 95°C , temperatura mantida por 15 minutos, sem que a solução seja fervida.

Após o período de aquecimento, a solução foi deixada para esfriar e, posteriormente, transferida para um balão volumétrico de 250 ml, adicionou-se água destilada até atingir o menisco. No caso de materiais com teor de potássio superior a 20% optou-se por realizar uma diluição em balão volumétrico de 500 ml.

Notou-se que parte do material que não era dissolvido, decantava, sendo assim, todas as soluções foram filtradas, com filtro de papel, para que nenhum resíduo físico interferisse na leitura.



Imagem 5. Transferência para o balão



Imagem 6. Filtragem das extrações.

3.2.4 Determinação

Para a análise, retirou-se uma alíquota de 2 ml da solução, a qual foi transferida para recipientes menores, e adicionaram-se 18 ml de água destilada, resultando em uma diluição de 10 vezes. As leituras de potássio foram realizadas em fotômetro de chama, o qual foi ajustado com solução padrão de 10 mg L^{-1} previamente preparada. Para os tratamentos que superaram o ponto máximo da curva de calibração, era realizada uma nova diluição, para que as leituras ficassem dentro da faixa de calibração do fotômetro.

3.2.5 Cálculo da Concentração de K_2O Total

Para determinar o teor de K_2O nos remineralizadores, foi utilizado um fotômetro de chama, que fornece leituras em mg L^{-1} de potássio (K). Esses valores são convertidos em porcentagem de K_2O , considerando a diluição da amostra e a relação estequiométrica entre K e K_2O .

O fotômetro foi calibrado com uma solução padrão de 10 mg L^{-1} de K, correspondendo a uma leitura de 100. Assim, a concentração de K na amostra (X) é obtida por regra de três simples:

Se 100 (leitura) $\rightarrow 10 \text{ mg L}^{-1}$ de K

Então L (leitura da amostra) $\rightarrow X \text{ mg L}^{-1}$ de K

$$X = \frac{L \times 10}{100} = \frac{L}{10}$$

Como a amostra foi submetida a diluições prévias, foi necessário corrigir o valor de X multiplicando pelo Fator de Diluição (FD). FD = 1000 (diluição inicial de 10x em 100 mL, considerando 1,0 g de amostra). Para o caso das amostras que não foi necessário maior diluição para estarem dentro dos pontos da curva de calibração.

Por fim, é necessário fazer a Conversão de K para K₂O e cálculo da porcentagem, sabe-se que o K₂O contém aproximadamente 83% de K em massa, portanto, divide-se o resultado por 0,83 para a conversão. Como o cálculo parte de mg L⁻¹ e a massa da amostra foi de 1,0 g (1000 mg), divide-se por 1.000.000 para transformar mg em gramas e ajustar a porcentagem.

$$\text{K}_2\text{O total} = \frac{\text{Leitura no fotômetro}}{(0,83 \times 1000)} = \frac{L}{830}$$

Todas as análises foram realizadas em triplicata, em diferentes períodos, para avaliar a confiabilidade, estabilidade e repetibilidade dos métodos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tabela 4. Análise da massa seca em gramas, da cultura do milho (*Pennisetum glaucum* (L.)) submetida a diferentes tratamentos.

Tratamentos	Massa seca (g)					
	Argiloso		Arenoso		Médias	
Glaucônia de Goiás	45,78	Ba	23,26	Db	34,52	D
Verdete	59,00	Aa	40,59	Cb	49,80	C
Termofosfato Magnésico	58,62	Aa	52,77	Ca	55,70	B
Termopotássio	50,37	Ba	46,06	Ca	48,21	C
Fonolito Hidrotermalizado	37,53	Ca	42,89	Ca	40,21	C
Kamafugito	48,63	Ba	51,13	Ca	49,88	C
Fonolito	48,90	Ba	40,92	Ca	44,91	C
Resíduo de Verdete	45,95	Ba	43,85	Ca	44,90	C
Glaucônia	33,42	Cb	59,54	Ba	46,48	C
Sulfato de Potássio	67,44	Aa	80,94	Aa	74,19	A
KCl	57,68	Ab	77,67	Aa	67,68	A
Testemunha	29,87	Ca	22,44	Da	26,15	D
Médias	48,60	a	48,50	a		
CV (%)	23,03					

Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 0,05 de significância; CV: Coeficiente de Variação.

Ao analisar a Tabela 4, nota-se que, todos os tratamentos apresentaram aumento significativo na produção de massa seca do milho em pelo menos um dos solos avaliados em relação à testemunha. Em ambos os solos, as maiores médias foram obtidas com o sulfato de potássio, KCl, indicando o efeito esperado das fontes altamente solúveis. No solo argiloso, as fontes verde e Termofosfato, não diferiram estatisticamente das fontes solúveis, e outras obtiveram desempenho intermediário, como Glaucônia de Goiás, termopotássio, Kamafugito e Fonolito aproximaram-se do desempenho das solúveis, diferindo significativamente da testemunha e superando outras fontes de baixa solubilidade, indicando que, em solos de alta CTC, parte do potássio liberado por fontes de menor solubilidade é retido e aproveitado pela cultura, reduzindo a diferença em relação às fontes mais prontamente disponíveis.

No solo arenoso, mesmo onde a capacidade de retenção de nutrientes é menor, todos os tratamentos diferiram da testemunha menos a Glaucônia de Goiás (Tabela 4). Sugerindo que certas fontes menos solúveis podem liberar potássio de forma suficientemente rápida para atender à demanda inicial da cultura, mesmo em ambiente de baixa CTC, possivelmente devido à combinação com outros nutrientes como cálcio, magnésio e silício, que favorecem o crescimento radicular e a absorção de água. Esses resultados reforçam que a eficiência de fontes alternativas não depende apenas da solubilidade imediata, mas também da interação com as

propriedades físico-químicas do solo e da capacidade da planta em explorar a rizosfera (Manning, 2018; Zorb et al., 2014; Novais et al., 2007).

Tabela 5. Análise de Teor de Potássio no solo, em miligramas por decímetro cúbico, da cultura do milho (*Pennisetum glaucum* (L.)) submetida a diferentes tratamentos.

Tratamentos	Teor de Potássio no solo (g dm ³)				
	Argiloso		Arenoso		Médias
Glaucônia de Goiás	18,95	Da	8,90	Ba	13,92 C
Verdete	17,55	Da	12,15	Ba	17,60 C
Termofosfato Magnésiano	274,60	Aa	156,67	Ab	215,63 A
Termopotássio	103,87	Ca	48,80	Ba	76,33 C
Fonolito Hidrotermalizado	8,85	Da	39,65	Ba	24,25 C
Kamafugito	18,92	Da	15,40	Ba	17,16 C
Fonolito	147,25	Ba	87,75	Aa	117,50 B
Resíduo de Verdete	197,35	Ba	76,85	Aa	137,10 B
Glaucônia	82,97	Ca	27,52	Ba	55,25 C
Sulfato de Potássio	135,35	Ba	101,90	Aa	118,62 B
KCl	100,90	Ca	108,0	Aa	104,45 B
Testemunha	17,55	Da	8,90	Ba	13,25 C
Médias	93,67	a	57,71	b	
CV (%)	72,18				

Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 0,05 de significância; CV: Coeficiente de Variação.

Ao analisarmos o efeito da textura do solo no Teor de Potássio (Tabela 5) nota-se que a média entre solos diferenciou significativamente, reflexo da maior capacidade de troca catiônica (CTC) que favorece a retenção do nutriente na forma trocável. No solo arenoso, os valores foram inferiores, tal comportamento se apresenta em conformidade com estudos prévios que relatam maior estabilidade e persistência do potássio em solos argilosos, enquanto solos arenosos apresentam maior vulnerabilidade à perda por percolação (Viana et al., 2021).

Nota-se também que o Termofosfato Magnésiano, Fonolito, Resíduo de verdetes e Sulfato de Potássio, obtiveram médias com diferença significativa superior ou iguais as fontes solúveis, em pelo menos um dos solos. Estudos já demonstraram que fertilizantes de liberação gradual, quando associados a elementos corretivos ou estruturantes do solo, podem apresentar eficiência aparente maior que fontes solúveis no médio prazo (Theodoro et al., 2013). Assim, o desempenho superior do termofosfato magnésiano frente ao KCl e ao sulfato de potássio pode ser explicado pela maior estabilidade do K liberado e pela ação complementar de Ca, Mg e Si na retenção e disponibilização do nutriente.

As fontes Termofosfato Magnésiano, Fonolito, Resíduo de verdetes, Sulfato de Potássio e KCl diferiram estatisticamente da testemunha, em ambos os solos, enquanto os demais tratamentos não. Sendo que no nosso argiloso ainda estavam em grupos estatisticamente

superiores a fontes Solúveis. Esses materiais podem possuir minerais potássicos de lenta solubilização, como feldspatos e nefelina, cuja liberação depende do intemperismo químico e da interação com ácidos orgânicos liberados pelas raízes e microrganismos. Estudos têm demonstrado que o fonolito, principalmente quando submetido a tratamentos como ativação mecânica ou térmica, pode aumentar consideravelmente sua disponibilidade de potássio, configurando-se como fonte de liberação gradual do nutriente (Teixeira et al., 2015).

Portanto, os dados confirmam que KCl, Sulfato de Potássio representam as fontes mais eficientes de disponibilização imediata do nutriente, enquanto o fonolito e o resíduo de verdete se destacam entre os remineralizadores por apresentarem resultados significativamente superior à testemunha. Já a Glaucionita, Verdete e escórias se mostraram pouco efetivos no curto prazo, reforçando seu caráter de fontes de liberação lenta. A diferença entre solos demonstra ainda que a eficiência de cada fonte é condicionada pela capacidade de retenção de nutrientes, sendo os solos argilosos mais favoráveis à manutenção do potássio disponível.

Tabela 6. Análise de Teor de Potássio foliar, em gramas por quilograma, da cultura do milheto (*Pennisetum glaucum* (L.)) submetida a diferentes tratamentos.

Tratamentos	Teor de Potássio foliar (g kg ¹)				
	Argiloso		Arenoso		Médias
Glaucionita de Goiás	15,66	Da	4,45	Bb	10,05 E
Verdete	25,12	Ca	4,77	Bb	14,95 D
Termofosfato Magnésiano	16,93	Da	5,92	Bb	11,42 D
Termopotássio	39,00	Ba	9,60	Bb	24,30 C
Fonolito Hidrotermalizado	26,23	Ca	5,10	Bb	15,66 D
Kamafugito	24,62	Ca	4,52	Bb	14,57 D
Fonolito	26,63	Ca	6,45	Bb	16,54 D
Resíduo de Verdete	27,25	Ca	8,70	Bb	17,96 D
Glaucionita	36,97	Ba	11,60	Bb	24,28 C
Sulfato de Potássio	53,10	Aa	24,83	Ab	38,96 A
KCL	53,54	Aa	20,45	Ab	36,98 A
Testemunha	7,86	Ea	2,43	Ba	5,15 F
Médias	29,41	a	9,07	b	
CV (%)	21,83				

Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 0,05 de significância; CV: Coeficiente de Variação.

Nota-se que em solo argiloso os teores foliares de K foram consistentemente maiores em relação ao solo arenoso para todos os tratamentos. Esse comportamento é esperado, visto que solos argilosos possuem maior capacidade de troca catiônica (CTC) e maior retenção de K. De acordo com Novais et al. (2007) e Sousa & Lobato (2011), a baixa CTC de solos arenosos favorece a perda de K por lixiviação. A testemunha manteve baixos valores de K foliar em

ambos os solos, devido a baixa fertilidade natural dos solos tropicais intemperizados e a forte dependência da adubação potássica, (Malavolta, 2006) (Prado, 2008).

A Glauconita também apresentou desempenho expressivo no solo argiloso, indicando que a maior CTC favoreceu a disponibilização gradual de K dessa fonte. Martins et al. (2015) destacam que a glauconita possui liberação lenta, mas pode manter teores adequados de K em longo prazo. O Termopotássio apresentou resultados próximos aos fertilizantes solúveis no solo argiloso, reforçando o potencial dessa fonte após ativação térmica (Oliveira et al., 2016). Fontes como Fonolito, Verdete e Resíduos de Verdete apresentaram valores intermediários, compatíveis com a literatura, que relata sua baixa solubilidade, mas com potencial de fornecimento gradual de K (Van Straaten, 2006; Lapido-Loureiro, 2004).

Tabela 7. Análise da Extração de Potássio, em miligramas gramas por vaso, da cultura do milheto (*Pennisetum glaucum* (L.)) submetida a diferentes tratamentos.

Tratamentos	Extração de Potássio (mg vaso ⁻¹)					
	Argiloso			Arenoso		Médias
Glauconita de Goiás	744,02	Da		102,30	Bb	423,16 F
Verdete	1427,80	Ca		194,87	Bb	811,33 E
Termofosfato Magnésiano	987,25	Da		309,42	Bb	648,33 E
Termopotássio	1965,55	Ba		440,95	Bb	1203,25 D
Fonolito Hidrotermalizado	983,15	Da		215,35	Bb	599,25 E
Kamafugito	1203,47	Ca		234,17	Bb	718,82 E
Fonolito	1286,95	Ca		265,17	Bb	776,06 E
Resíduo de Verdete	1278,92	Ca		37,95	Bb	810,43 E
Glauconita	1208,62	Da		686,07	Bb	947,35 D
Sulfato de Potássio	3576,67	Aa		2008,32	Ab	2792,50 A
KCL	3084,60	Aa		1612,72	Ab	2348,66 B
Testemunha	239,52	Ea		51,75	Bb	145,63 F
Médias	1498,88	a		513,25	b	
CV (%)	32,80					

Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 0,05 de significância; CV: Coeficiente de Variação.

A extração de potássio apresentou diferenças marcantes entre as texturas avaliadas, sendo significativamente maior no solo argiloso em comparação ao arenoso. Esse resultado está diretamente relacionado ao maior teor foliar observado nesse solo e confirma o papel da maior capacidade de troca de cátions (CTC) e da menor lixiviação na retenção e absorção do K em solos de textura mais fina (Novais et al., 2007; Sousa & Lobato, 2011). Em contrapartida, no solo arenoso, a baixa CTC e a maior drenagem reduzem a eficiência de aproveitamento das fontes, conforme já discutido por Prado (2008).

Dentre os remineralizadores avaliados o Termopotássio apresentou desempenho expressivo, alcançando valores próximos às fontes convencionais no solo argiloso, embora tenha mostrado reduções significativas no solo arenoso. A glauconita, por sua vez, exibiu comportamento intermediário, mas consistente, reforçando sua característica de liberação lenta de K, como apontado por Martins et al. (2015). Outras fontes, como verdete, fonolito e kamafigito, também apresentaram valores intermediários, compatíveis com a baixa solubilidade relatada na literatura (Lapido-Loureiro, 2004; Van Straaten, 2006).

De modo geral, todos os tratamentos diferiram da testemunha no solo argiloso, evidenciando o fornecimento efetivo de K pelas fontes testadas. Entretanto, a magnitude das respostas foi condicionada pela textura do solo, confirmando que a eficiência de remineralizadores e fontes alternativas depende fortemente da capacidade de retenção do solo e da dinâmica de liberação do nutriente.

Tabela 8. Percentual recuperado pelos extratores em relação ao teor total de potássio.

Fonte	Extratores											
	Ac. Tart.		Ac. Cit.		Ac. Tart.		Ac. Cit.		CNA		Água	
	Ac. Tart.		Ac. Cit.		Fluor		Fluor					
1	5,79	Eb	0,01	Ac	23,25	Ea	12,33	Fa	16,01	Ea	4,99	Db
2	2,78	Eb	0,02	Ab	22,39	Ea	21,07	Ea	17,37	Ea	9,34	Db
3	92,17	Ab	0,57	Af	134,29	Aa	43,37	Cd	69,48	Cc	24,68	Ce
4	67,62	Ca	0,59	Ae	16,47	Ed	54,39	Cb	65,36	Ca	33,88	Cc
5	2,15	Eb	0,01	Ab	17,17	Ea	16,76	Ea	16,73	Ea	1,75	Db
6	17,68	Db	0,08	Ac	46,65	Da	48,55	Ca	26,02	Db	5,88	Dc
7	13,34	Eb	0,11	Ac	18,79	Ea	24,34	Ea	21,88	Da	7,76	Dc
8	25,04	Dc	0,20	Ad	67,42	Ca	38,44	Db	23,12	Dc	9,54	Dd
9	20,25	Dc	0,10	Ad	89,54	Ba	53,95	Cb	16,92	Ec	5,42	Dd
10	71,45	Bb	0,36	Ae	39,77	Dd	83,44	Ba	88,02	Ba	59,58	Bc
11	88,75	Aa	0,99	Ab	90,92	Ba	99,18	Aa	99,63	Aa	96,67	Aa
C.V (%)							11,86					

Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 0,05 de significância; CV: Coeficiente de Variação.

A Tabela 8 demonstra o percentual de potássio recuperado por diferentes extratores em relação ao teor total de K das fontes estudadas. Observa-se que a eficiência de solubilização variou significativamente entre os extratores utilizados, evidenciando comportamentos distintos quanto à capacidade de dissolver os minerais potássicos. O ácido cítrico isolado apresentou os menores percentuais de recuperação em praticamente todas as fontes, com valores inferiores a 1% em diversas amostras, o que demonstra sua baixa capacidade de solubilizar o K presente nas estruturas minerais testadas. Esse resultado é coerente com o observado por Raji (2011), que aponta que ácidos orgânicos fracos, como o cítrico, têm menor poder de dissolução sobre silicatos devido à limitação na quebra de ligações Si–O–K.

Por outro lado, os extratores contendo fluoretos, tanto o ácido tartárico + fluoreto de sódio quanto o ácido cítrico + fluoreto de amônio, apresentaram os maiores percentuais de K recuperado. Esses resultados indicam que a presença do íon fluoreto aumenta a capacidade de ataque às estruturas minerais, favorecendo a liberação do potássio. De acordo com Silva et al. (2016) e Carvalho et al. (2020), os fluoretos atuam promovendo a complexação do alumínio e do silício da rede cristalina, o que enfraquece as ligações e facilita a solubilização de cátions como o K^+ .

O extrator CNA (citrato neutro de amônio) também apresentou resultados expressivos, situando-se entre os métodos mais eficientes. Essa eficiência pode estar associada à capacidade do citrato de formar complexos com metais e à presença de amônio, que promove troca iônica com o potássio adsorvido, conforme discutido por Luz et al. (2010) e Theodoro et al. (2013). Já a extração em água apresentou valores intermediários, condizentes com sua natureza branda, refletindo apenas a fração mais solúvel e prontamente disponível do K presente nas fontes.

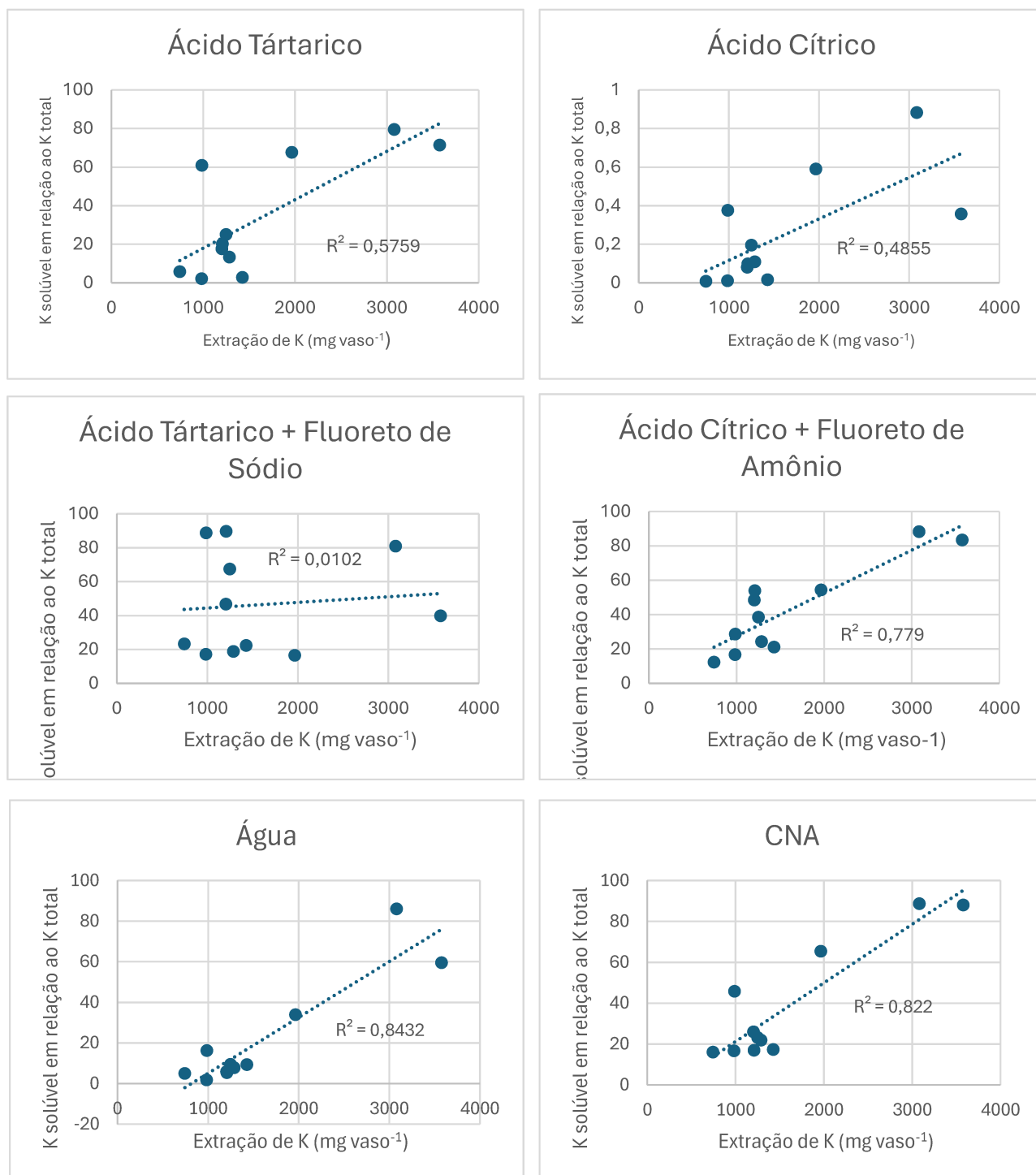


Imagem 7. Correlações entre a porcentagem de K recuperado pelos extratores, em relação ao K total das fontes em solo LVdt.

Entre os extratores testados, a água e a solução de CNA apresentaram o melhor ajuste, indicando maior capacidade preditiva da disponibilidade de K às plantas. Já o ácido tartárico +

fluoreto de sódio apresentou desempenho praticamente nulo, evidenciando inadequação do método para esse fim. Os demais extratores mostraram correlações moderadas, sugerindo que extraem frações distintas de K (solúvel, trocável e estrutural), mas não capturam integralmente a dinâmica da absorção vegetal.

O solo argiloso tem maior CTC, devido ao alto teor de argilas e óxidos de ferro e alumínio. Isso significa que boa parte do potássio liberado pelas fontes acaba sendo adsorvido aos coloides do solo, tornando-se menos disponível na solução do solo, mesmo que o teor total seja alto.

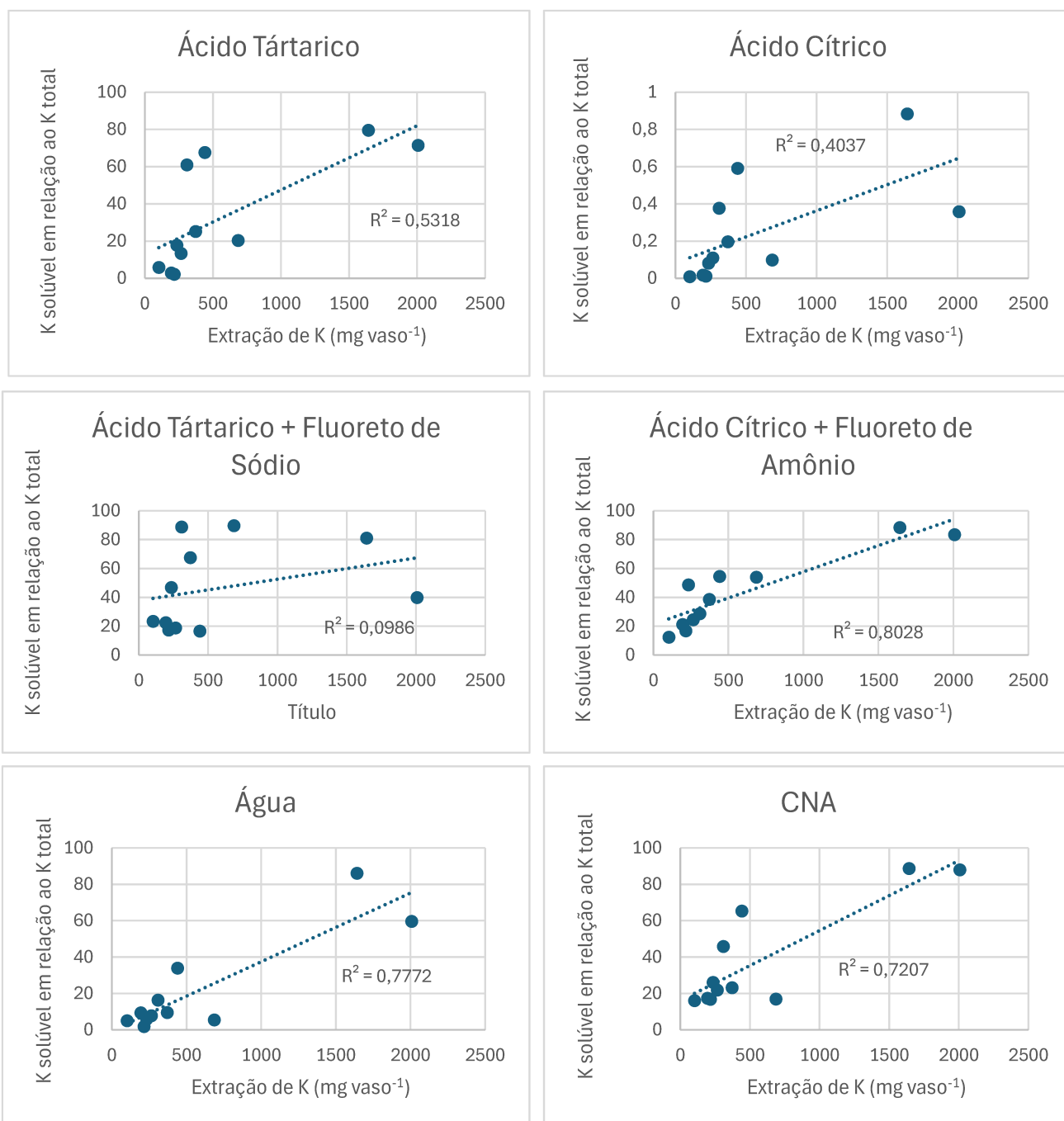


Imagem 8. Correlações entre a porcentagem de K recuperado pelos extratores, em relação ao K total das fontes em solo RQo.

No solo arenoso, os valores de correlação entre a extração de potássio (mg vaso⁻¹) e o K solúvel nos diferentes extratores apresentaram, de forma geral, coeficientes altos, se comparados ao do solo argiloso. Isso é esperado em solos de baixa CTC e menor adsorção de

K, permitindo que o potássio liberado pelas fontes permaneça em maior proporção na solução do solo, sendo mais facilmente absorvido pelas plantas.

Observou-se que o extrator ácido cítrico + fluoreto de amônio apresentou o maior coeficiente seguido pela Água e pelo CNA. Esse resultado indica que a combinação do ácido orgânico com o fluoreto potencializa a solubilização de minerais potássicos, simulando de forma mais eficiente os mecanismos de liberação natural do K no solo, conforme descrito por Huang e Keller (1970) e Azevedo (2014). A Água e o CNA, por sua vez, apresentaram correlações um pouco mais baixas, mas ainda com comportamento semelhante ao solo LVdt, que pode estar relacionado à menor capacidade de extração iônica, mas ainda assim demonstraram boa associação com a absorção de K pelas plantas, especialmente em solos de menor CTC.

CONCLUSÃO

Observou-se que o comportamento dos extratores variou conforme a textura do solo. No solo argiloso, os extratores mais eficientes foram Água, CNA e ácido cítrico + fluoreto de amônio, refletindo a maior capacidade de troca catiônica e a adsorção de K nas frações coloidais, o que exige extratores de maior força química. Já no solo arenoso, os melhores resultados foram obtidos com o ácido cítrico + fluoreto de amônio, seguido pela Água e pelo CNA, indicando que a menor CTC e a maior mobilidade do K permitem que extratores mais brandos reproduzam de forma mais fiel a disponibilidade real do nutriente. Assim, os extratores Água, Ácido cítrico + fluoreto de amônio e CNA mostraram-se consistente e sensível em ambos os solos, podendo ser considerado o método mais adequado para avaliar a solubilidade de fontes alternativas de potássio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, A. C. **Solubilidade de rochas potássicas em diferentes extratores e sua avaliação em casa de vegetação**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.
- BRASIL. Presidência da República. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050**. Brasília: SAE/PR, 2022.
- CARVALHO, A. M. X.; LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. **Potencial de rochas potássicas brasileiras como fonte alternativa de fertilizantes**. *Geociências*, v. 39, n. 1, p. 45–58, 2020.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Potencial brasileiro de rochas e minerais para uso como remineralizadores de solos**. Brasília: CPRM, 2021.
- HUANG, W. H.; KELLER, W. D. **Dissolution of rock-forming silicate minerals in organic acids: simulated weathering by organic chelating agents**. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 29, n. 1, p. 43–52, 1970.
- LAPIDO-LOUREIRO, F. E. K. **Aproveitamento agrícola de rochas silicáticas brasileiras como fontes de potássio**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. 47 p. (Série Estudos e Documentos, 56).
- LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F.; CASTILHOS, Z. C. de (org.). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 400 p.
- MARTINS, E. S. et al. **Rochagem e sustentabilidade no campo: uma alternativa para remineralização dos solos**. Brasília: Embrapa, 2015. 132 p.
- PRADO, R. de M. **Nutrição de plantas**. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 407 p.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011.
- RIBEIRO, Genicelli Mafra; ALMEIDA, J. A.; SILVA, Leandro. **Solubilização de fonolito, basalto e olivina melilitito em ácido cítrico e ácido acético**. p. 39, 2017.
- SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2011. 416 p.
- SILVA, A. F.; MARTINS, E. S.; LUZ, A. B. **Mecanismos de liberação de potássio em minerais silicatados**. *Revista Geociências*, v. 35, n. 2, p. 257–268, 2016.
- THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O.; FYFE, W. S. **Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution**. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 85, n. 4, p. 1387-1398, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000400007>
- VAN STRAATEN, P. **Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities**. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 78, n. 4, p. 731-747, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000400009>

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>

RAMOS, C. G. **Avaliação da aplicação de fonolito como fertilizante alternativo de potássio**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RIBEIRO, C. C. **Reatividade de rochas silicáticas como fontes alternativas de potássio**. 2017. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.