

## Disponibilidade e absorção de nutrientes liberados por remineralizador em duas classes de solo

### *Availability and absorption of nutrients released by remineralizer in two soil classes*

Augusto Vaghetti Luchese<sup>1</sup>, Robson Fernando Missio<sup>2</sup>, Alessandra Algeri<sup>3</sup>, Ana Paula da Silva Giaretta<sup>4</sup>, Amanda Luiza Ludwig<sup>5</sup>, Guilherme Potrich<sup>6</sup>

**RESUMO:** Os pós de rochas, denominados de remineralizadores, têm sido estudados devido à constante busca por alternativas para o fornecimento de nutriente, com distinções na resposta entre cada material. Devido às diferenças obtidas, o presente trabalho visa determinar quais nutrientes são liberados e extraídos pelas culturas com a aplicação do basalto estudado. Assim, para avaliar o efeito de pó de basalto, foram conduzidos quatro ensaios em arranjo fatorial  $2 \times 4 + 2$ : 2 solos (com textura argila e com textura areia), quatro doses (Remineralizador, 33, 66 e 99 Mg ha<sup>-1</sup>; calcário: 0, 1, 2 e 4 Mg ha<sup>-1</sup>) e dois tratamentos adubados com K<sub>2</sub>O ou P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na dose de 80 kg ha<sup>-1</sup>, com soja e milho com quatro repetições. Os materiais melhoraram as propriedades do solo e promoveram ganhos na massa de matéria seca das duas culturas, à exceção do milho cultivado em solo com textura areia. Dentre os benefícios obtidos, foram obtidos aumentos do pH em todos os ensaios e o aumento de Ca<sup>+2</sup> no solo pela aplicação dos materiais. Uma pequena liberação de K pelo remineralizador foi eficiente para manter os teores deste nutriente no solo, apesar do aumento da extração de K, que impediu a redução dos teores, como verificado na aplicação de calcário. Por fim, ocorreram aumentos de P somente nos solos com a aplicação do remineralizador.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rochagem; Soja; Milho; Pó de rocha.

**ABSTRACT:** Rock powders, named as remineralizers, have been studied due to the constant research for alternatives to supply nutrients, which present several different responses according to material. Thus, this study aims at determining which nutrients are released and extracted by crops with the application of the studied basalt, due to the obtained differences. So, in order to evaluate the effect of basalt powder, this study included four experiments in a  $2 \times 4 + 2$  factorial arrangement: two soils (clay and sandy), four doses (Remineralizer: 0, 33, 66, and 99 Mg ha<sup>-1</sup>; limestone: 0, 1, 2, and 4 Mg ha<sup>-1</sup>) and 2 treatments fertilized with K<sub>2</sub>O and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> at a 80 kg ha<sup>-1</sup> dose, in soybean and corn, with four replications. The supplies have improved soil proprieties and provided gains in shoot dry matter mass of both crops, but cropped corn in sandy soil. Some obtained benefits were: increase in pH in all essays, increase in Ca<sup>2+</sup> in soil due to the supplies application. There was also a small release of K by remineralizar, which was efficient to keep the levels of this nutrient in soil, despite its increased extraction. This interfered on reducing its levels as it was observed when limestone was applied. Finally, there were increases in P levels only in soils with REM application.

**KEY WORDS:** Stonemeal; Soybean; Corn; Rock dust.

**Autor correspondente:** Augusto Vaghetti Luchese  
E-mail: aluchese@gmail.com

Recebido em: 2023-09-28  
Aceito em: 2024-04-10

<sup>1</sup> Doutor/Professor Associado do Departamento de Ciências Agrônômicas da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Palotina (PR), Brasil.

<sup>2</sup> Doutor/Professor Associado do Departamento de Ciências Agrônômicas da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Palotina (PR), Brasil.

<sup>3</sup> Doutoranda do programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Palotina (PR), Brasil.

<sup>4</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Pato Branco (PR), Brasil.

<sup>5</sup> Acadêmico(a) de Agronomia da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Palotina (PR), Brasil.

<sup>6</sup> Acadêmico de Agronomia da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Palotina (PR), Brasil.

## INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira necessita buscar novas formas para recuperar a fertilidade dos solos sem a forte dependência das importações de fertilizantes. Dentre as alternativas atuais, o remineralizador, conhecido popularmente como pó de rocha, é uma possibilidade para aumentar a autonomia brasileira no que diz respeito à produção de fertilizante. É um processo de elevado grau de moagem, o qual facilita a disponibilização dos nutrientes pela maior exposição superficial dos minerais aos agentes das reações de alteração e lixiviação (Kautzmann *et al.*, 2013). A tecnologia de remineralização contribui em âmbito econômico com a redução da dependência de fertilizantes importados e, no aspecto ambiental estão associados à mineração de rochas, pois, a proposta é utilizar os rejeitos das mineradoras como uma opção sustentável para a fertilização do solo (Brito *et al.*, 2019; Dalmora *et al.*, 2020).

Diversos trabalhos têm demonstrado que a aplicação de remineralizadores é benéfica para o sistema solo-planta e pode substituir ou complementar os fertilizantes solúveis, além de promover a disponibilidade e a liberação lenta dos macro e micronutrientes para, consequentemente, reequilibrar o pH do solo (Dalmora *et al.*, 2020; Daniell; Van Tonder, 2023; Luchese *et al.*, 2021; Ramos *et al.*, 2015). Como existem diversos materiais que podem ser considerados remineralizadores, são esperadas respostas distintas entre eles. Um exemplo é o estudo realizado com dunito por Crusciol *et al.* (2019), na cultura do milho, que apresentou incrementos nos teores de Mg e Si na planta e no solo e correção da acidez (pH) com a aplicação de dunito em solos com textura argila e com textura areia, que, consequentemente, acarretou em maior crescimento vegetativo, como enchimento e rendimento de grãos.

No ensaio realizado Silva *et al.* (2017), com a aplicação de remineralizador de diabásio, verificou-se também o aumento da capacidade de troca catiônica efetiva sem aumento do pH, fenômeno justificado pela precipitação de fases oxídicas amorfas. Assim, o basalto tem sido o foco de inúmeros estudos de longo prazo sobre a fertilidade do solo e pode apresentar resultados distintos a depender do solo utilizado, do basalto empregado e da cultura semeada (Anda; Shamshuddin; Fauziah, 2015; Lewis *et al.*, 2021; Luchese *et al.*, 2023b).

A hipótese deste estudo é a de que a utilização de remineralizadores do solo promove o aumento na disponibilidade de nutrientes. Assim, o objetivo deste estudo foi verificar a disponibilidade e a absorção de nutrientes, proporcionadas pela aplicação de remineralizadores no solo.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram instalados quatro ensaios em vasos, com capacidade de 5 L, em casa de vegetação na Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, em Palotina-PR, com dois produtos (remineralizador e calcário) e duas culturas (soja e milho), em esquema fatorial  $2 \times 4 + 2$ : 2 (dois solos com textura argila e textura areia; quatro doses: remineralizador 0, 33, 66 e 99 Mg ha<sup>-1</sup> ou calcário 1, 2 e 4 Mg ha<sup>-1</sup>) além das testemunhas com P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> ambas na dose de 80 kg ha<sup>-1</sup>. O calcário foi aplicado somente nos ensaios em que este insumo caracterizou o tratamento. Utilizou-se para o tratamento com remineralizador o material originado da rocha basáltica, oriundo do estado de São Paulo, com composições química e granulométrica conhecidas (Tabelas 1 e 2). O Calcário utilizado é caracterizado como calcário calcítico com 45% de CaO, 4% de MgO e PRNT de 72,5%.

**Tabela 1.** Composição química do pó de rocha utilizado no experimento obtido por espectrometria de fluorescência de raios x

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PF*	Soma
49,89	12,82	14,09	8,96	5,24	1,13	2,41	3,09	0,20	0,39	1,13	99,34

SiO<sub>2</sub>: dióxido de silício; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: óxido de alumínio; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: óxido de ferro; CaO: óxido de cálcio; MgO: óxido de magnésio; K<sub>2</sub>O: óxido de potássio; Na<sub>2</sub>O: óxido de sódio; TiO<sub>2</sub>: dióxido de titânio; MnO: óxido de manganês; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: pentóxido de fósforo; PF: perda ao fogo.

Fonte: Dados da pesquisa (2020).

**Tabela 2.** Análise granulométrica por peneiramento do pó de rocha utilizado no experimento

Aberturas (mm) <sup>1</sup>	2	0,85	0,3	<0,3
Massa Retida (%) <sup>2</sup>	0	8,0	28,5	63,5

1) Diâmetro da abertura da peneira; 2) Material retido em cada peneira.

Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Os solos foram coletados, secos, peneirados e, em seguida, dispostos nos vasos de 5 L. Os tratamentos foram calculados para uma relação de volume sendo 1 ha correspondente a 2.000.000 litros de solo. Os solos escolhidos para o desenvolvimento do estudo foram coletados em superfície (profundidade 0 - 0,20 m) em propriedades agrícolas do município de Guaíra-PR (com textura areia) e Cascavel-PR (com textura argila) (Tabela 3).

**Tabela 3.** Análises química e granulométrica dos solos utilizados

Texturas	pH CaCl <sub>2</sub>	Al <sup>3+</sup>	H+Al ----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	P mg dm <sup>-3</sup>	CO g kg <sup>-1</sup>	Areia	Silte ----- g kg <sup>-1</sup> -----	Argila
ARG	4,9	0	5,74	1,9	1,4	0,15	1,30	22,6	288	159	553
ARE	6,2	0	2,04	1,3	0,9	0,03	23,01	4,72	945	3	52

ARG: solo de textura argila; ARE: solo de textura areia; pH (CaCl<sub>2</sub>) (0,01 mol L<sup>-1</sup>): relação solo/solução de 1:2,5; teores de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, e Al<sup>3+</sup> foram extraídos utilizando KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; teores de K<sup>+</sup> e P foram extraídos por Mehlich I; CO (carbono orgânico) foi determinado utilizando a metodologia Walkley Black; H+Al (acidez potencial total) foi determinada pelo método de solução tamponada SMP.

Fonte: Dados da pesquisa (2020).

Os tratamentos foram incorporados ao solo em 2 de outubro de 2020 e, por um período de 60 dias, os vasos em estudo foram mantidos umedecidos para promover a reação dos tratamentos. Posteriormente, no dia 1 de dezembro de 2020, foi realizada a semeadura de cinco sementes de soja (Monsoy 6210) e cinco sementes de milho (Morgan 618) nos respectivos vasos. As sementes de soja foram previamente inoculadas com *Bradyrhizobium* sp. Aos 20 dias após a semeadura, realizou-se o desbaste deixando apenas duas plantas por vaso. O experimento foi irrigado manualmente todos os dias durante todo o período de condução do mesmo. Na cultura do milho, 35 dias após o plantio, realizou-se uma adubação nitrogenada com ureia na dose equivalente a 100 kg de N ha<sup>-1</sup>.

A colheita do experimento foi realizada no dia 23 de janeiro de 2021 constando com o corte da parte aérea das plantas e a coleta de solo. O material coletado foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 50 °C por aproximadamente 48 horas, com posterior pesagem (apenas do tecido vegetal) e moagem para análise.

As avaliações de pH em CaCl<sub>2</sub> (potenciometria), P (espectrofotometria) e K (fotometria) em Mehlich I, Ca e Mg (volumetria) em KCl 1 M seguiram os procedimentos descritos por Pavan *et al.* (1992). As amostras da parte aérea foram abertas pelo método de digestão sulfúrica, sendo determinado P por colorimetria e K

por fotometria de chama (Silva, 2009). Todos os dados coletados foram tabulados e submetidos ao teste de homogeneidade da variância e da distribuição normal (Kolmogorov Smirnov and Shapiro Wilk).

Subsequentemente, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F e, em casos de significância para as doses (fator quantitativo), uma análise de regressão foi realizada para testar o modelo de melhor ajuste dos dados, como recomendado por Ferreira (2011). Todas as análises foram realizadas com o software Sisvar (Ferreira, 2011).

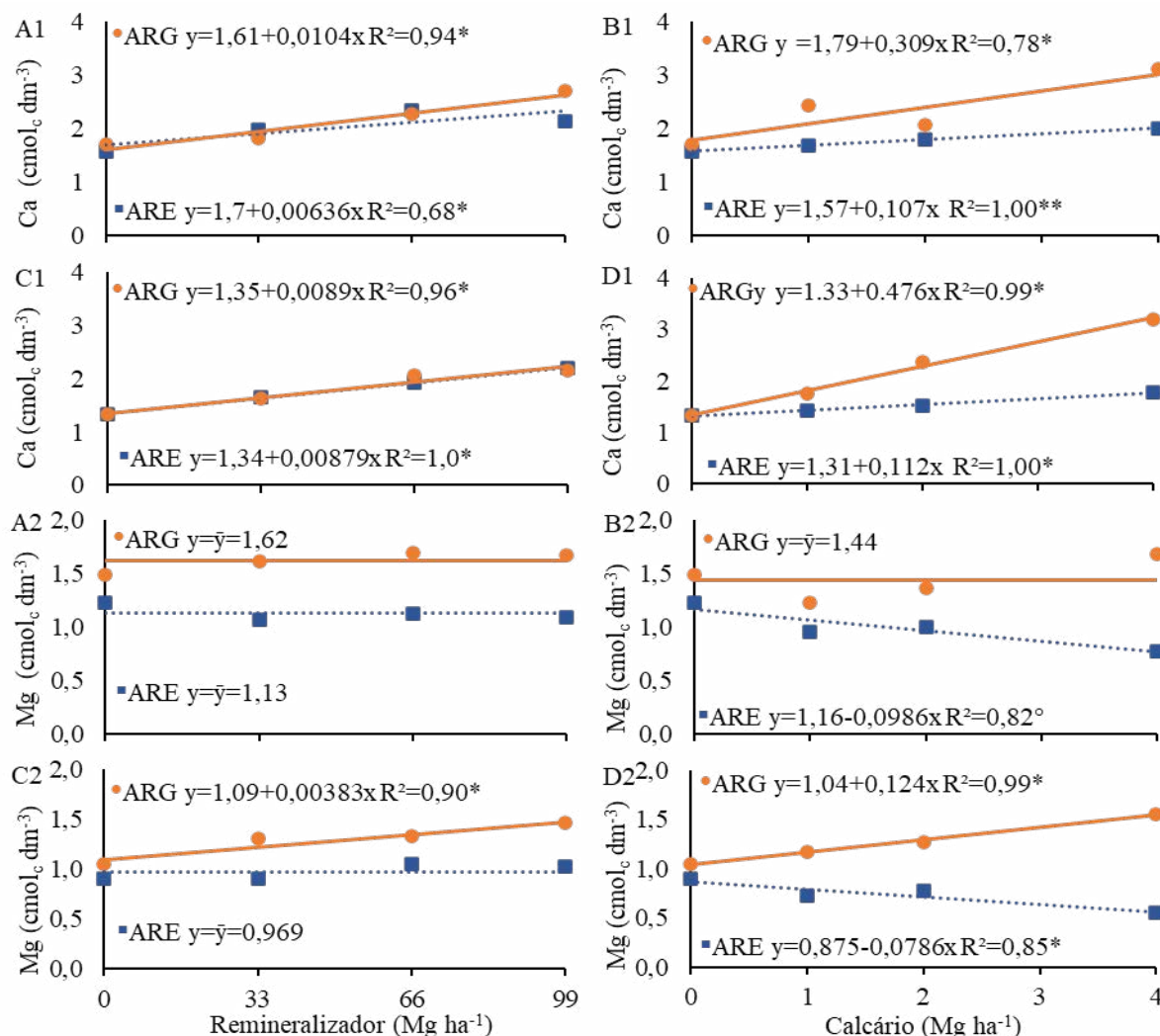
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais macronutrientes de interesse econômico constituintes do pó de rocha que devem promover melhoras na fertilidade dos solos avaliados são CaO (8,96%), MgO (5,24%), K<sub>2</sub>O (1,13%) e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0,39%). Observa-se que, na análise dos óxidos do pó de rocha, realizada por fluorescência de raios-X, os valores de Ca e Mg são apresentados em óxidos (Tabela 1), o que não significa que estes elementos realmente estejam na forma de óxidos ou de carbonatos, como ocorre no calcário, pois nos remineralizadores de rochas silicáticas basálticas, estes elementos encontram-se frequentemente como constituintes de minerais presentes como dos grupos dos plagioclásios, piroxênios e feldspatos (Bergmann *et al.*, 2014; Kelland *et al.*, 2020; Lewis *et al.*, 2021; Luchese *et al.*, 2023a; Ramos *et al.* 2015).

Independente da forma em que se encontra o Ca, aumentos significativos dos teores de Ca no solo foram apresentados, independente do tratamento com remineralizador ou calcário em ambas as culturas semeadas (Figura 1 A1, B1, C1 e D1).

Embora exista uma grande diferença de doses com o calcário sendo aplicado com uma dose final 24,75 vezes menor que o remineralizador, devemos levar em consideração que o calcário apresenta concentração de CaO 5,02 vezes maior que o remineralizador na forma de carbonato, o qual possui maior solubilidade quando comparado aos minerais silicatados, constituintes do pó de rocha, a exemplo dos plagioclásios Labradorita, Andesina e Anortita (Bergmann *et al.*, 2014; Ramos *et al.*, 2015). Esta diferença nos constituintes garante maior solubilidade do Ca do calcário.

O aumento dos teores de Ca no solo pelo remineralizador, encontrados neste estudo, corrobora com a literatura sobre rochagem, e demonstra que o cálcio é potencialmente liberado por estes materiais (Anda; Shamshuddin; Fauziah, 2013; Kelland *et al.*, 2020; Luchese *et al.*, 2021, 2023a; Silva *et al.*, 2017). Enquanto os teores de Ca no solo apresentaram aumento pela aplicação de calcário ou remineralizador, os teores de Mg apresentaram aumento nos teores somente no solo de textura argila, cultivado com milho, independente do material aplicado (remineralizador ou calcário), com as doses mais altas disponibilizando Mg apenas para a manutenção dos teores iniciais deste nutriente solo (Figura 1 C2 e D2) (Tabela 3). Quando cultivado com soja, o solo de textura argila não apresentou resultado estatisticamente significativo, independente do tratamento com calcário ou remineralizador (Figura 1 A2 e B2). Com relação ao solo de textura areia, não se verificou efeito estatístico significativo, somente foi observada uma tendência da diminuição dos teores do Mg em função da aplicação das doses de calcário (Figura 1 A2, B2, C2 e D2). Logo, é possível associar a falta de resposta ou resposta negativa nos teores de Mg no caso do calcário, ao tipo de calcário aplicado, que apresenta apenas 4% de MgO, que foi insuficiente para manter os níveis de Mg no solo, devido à maior extração realizada pelas culturas.



**Figura 1.** Teores de cálcio (1) e magnésio (2) no solo em função de doses de remineralizador e calcário, aplicadas com remineralizador na soja (A), calcário na soja (B), remineralizador no milho (C), calcário no milho (D), em solo de textura areia (ARE) e textura argila (ARG). \*\*, \* e ° indicam significância estatística de 1%, 5% e 10%, respectivamente.

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

O remineralizador embora apresente teores de MgO (5,24%) maiores do que os apresentados pelo calcário (4,0%), mesmo sendo aplicado em doses bem superiores, também não foi capaz de apresentar incrementos significativos de Mg no solo, além da condição inicial deste. Comparando os teores de Mg aplicados, 160 kg na dose de 4 Mg ha<sup>-1</sup> no calcário e 5.188 kg pela dose de 99 Mg ha<sup>-1</sup> no remineralizador, seria possível esperar respostas mais expressivas pelo remineralizador. Entretanto, o Mg, assim como o Ca, ocorre na forma de carbonatos no calcário, que são mais solúveis que as formas silicatadas dos minerais do remineralizador e Augita e Diopsídio são os mais comuns (Kelland *et al.*, 2020; Luchese *et al.*, 2023a; Ramos *et al.*, 2015), e pouco do elemento é liberado pelo remineralizador no período de tempo decorrido pelo presente estudo.

Cabe ressaltar que existe preferência de ruptura nas ligações com os óxidos ou oxidróxidos e a liberação dos elementos de minerais ocorre na seguinte ordem: CaO > MgO > Al(OH)<sub>3</sub> > FeOOH > SiO<sub>2</sub>. Assim, os minerais silicatados, com a presença de Ca, têm uma taxa de dissolução maior do que minerais com Mg em sua constituição (Oelkers, 2001; Swoboda; Döring; Hamer, 2022).

A disponibilização de Mg para o solo por remineralizadores originados de rochas ígneas tem apresentado resultados distintos, embora alguns autores tenham obtido incrementos dos teores de Mg

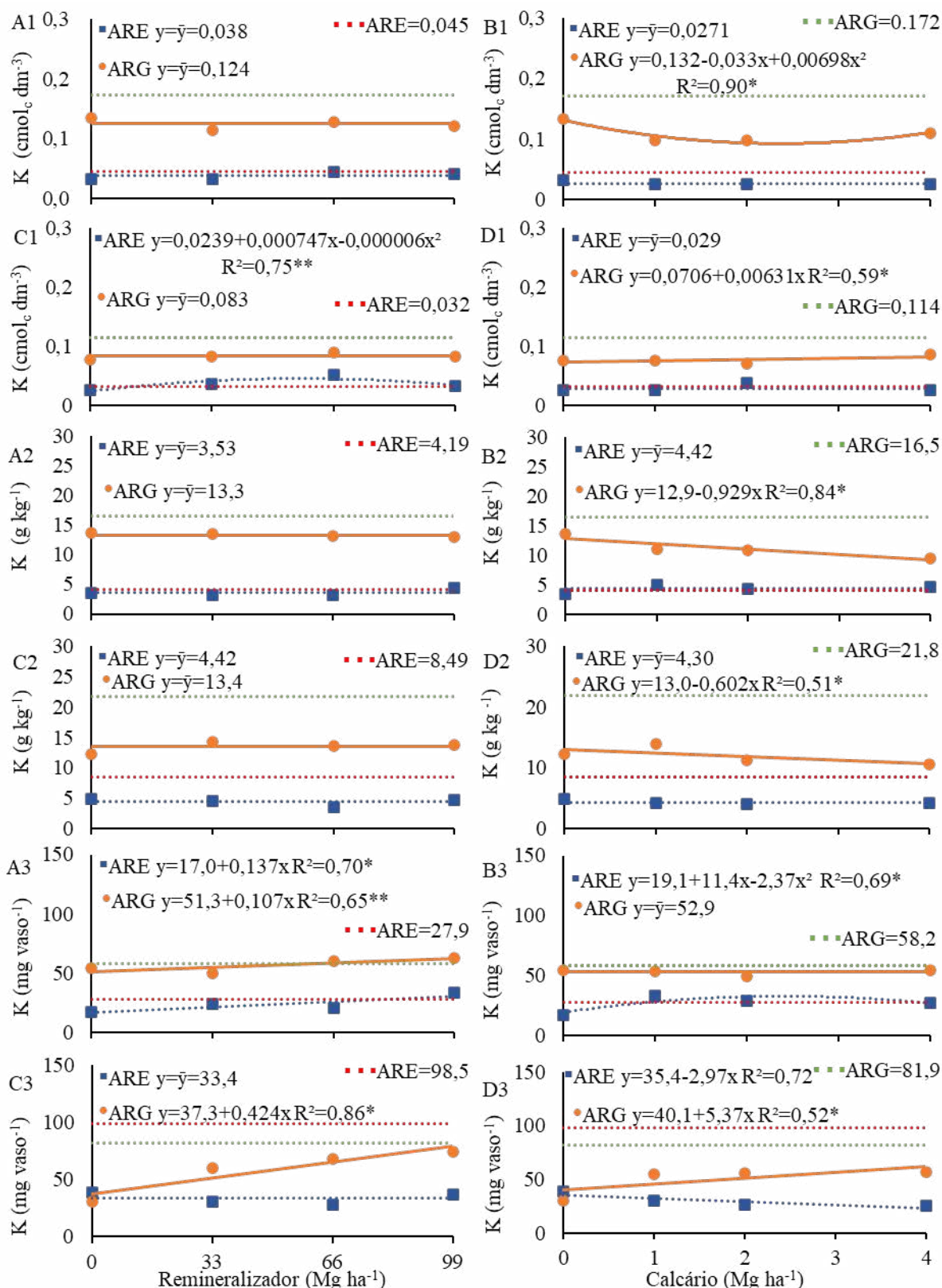
no solo com a aplicação de remineralizadores, ou verificado que essa disponibilidade é mais frequente do que a falta de resposta (Anda; Shamshuddin; Fauziah, 2013; Swoboda; Döring; Hamer, 2022). Há trabalhos que também não verificam incrementos, ou até apresentam reduções nestes teores, como no presente estudo (Luchese *et al.*, 2021, 2023a). Demonstra-se, portanto que, para este nutriente, a aplicação de remineralizadores pode ou não exercer efeito significativo. Isso mostra a grande dependência dos minerais existentes e a concentração nos remineralizadores, os quais possibilitarão o fornecimento deste nutriente ao solo.

O potássio apresentava inicialmente teores caracterizados como médios e muito baixos para solos de texturas textura argila e textura areia, respectivamente (Tabela 3) (SBCS/NEPAR, 2019), logo, há a possibilidade de se limitar severamente o desenvolvimento das culturas. A aplicação de calcário não promoveu incrementos dos teores de K no solo, ao contrário, os teores desse nutriente reduziram com a aplicação deste material (Figura 2 B1 e D1). E, mesmo quando as culturas reduziram a extração do nutriente (Figura 2 B3 e D3), não foram obtidos teores no solo maiores que a testemunha adubada com K (Figura 2 B1 e D1).

É importante notar que o aumento da extração de K, promovido pelo aumento das doses de calcário, não ocorreu pelo aumento dos teores de K no tecido foliar já que neste parâmetro houve decréscimo quanto aos seus teores com o aumento das doses (Figura 2 D2). A baixa influência do calcário com relação ao nutriente K era esperada visto que este elemento não está presente na constituição do corretivo aplicado. Esse mesmo comportamento, com a diminuição nos teores de K no solo, foi observado em outros estudos quando se avaliou o uso de remineralizadores, comparado com o calcário (Luchese *et al.*, 2021; 2023a).

Assim, a liberação de K promovida pelo remineralizador não foi suficiente para aumentar os teores de K no tecido vegetal das plantas de soja ou milho. No caso do milho, os teores encontrados no tecido foliar foram muito diferentes aos teores encontrados nas plantas que receberam adubação potássica (Figura 2 A2 e C2). Contudo, este resultado foi suficiente para manter os teores de K no solo mesmo com o aumento significativo da extração deste nutriente promovido pela cultura, a não ser no caso do milho cultivado em solo de textura areia, em que não foi observado aumento no crescimento da cultura (Figura 2 A1, C1, A3 e C3).





**Figura 2.** Teores de K no solo (1), na planta (2), e nutriente extraído (3) em função das doses aplicadas de remineralizador e calcário, com remineralizador na soja (A), calcário na soja (B), remineralizador no milho (C), calcário no milho (D), em solo de textura areia (ARE) e textura argila (ARG). ■ ■ ■ e ■ ■ ■ correspondem ao controle com K<sub>2</sub>O no solo com textura areia e textura argila, respectivamente. \*\*, \* e ° indicam significância estatística de 1% e 5% e 10%, respectivamente.

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Embora ocorram trabalhos em que não se observa aumento significativo dos teores de K no solo com a aplicação de remineralizador oriundo de rocha basáltica (Luchese *et al.*, 2021; 2023a; Silva *et al.*, 2017; Swoboda *et al.*, 2023), outros trabalhos têm demonstrado a disponibilização de K por rochas basálticas, em períodos relativamente curtos de interação solo/remineralizador. Tal resposta varia em relação às doses aplicadas, ao tipo de solo utilizado e à espécie cultivada (Anda; Shamshuddin; Fauziah, 2015; Luchese *et al.*, 2021), sobretudo, quando as rochas utilizadas apresentam maior teor de K ou mesmo apresentam minerais mais solúveis, que favorecem a liberação do nutriente na constituição mineralógica (Mancuso *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2019).

Mohammed *et al.* (2014) demonstraram claramente a diferença de liberação de K por minerais distintos, quando avaliaram o desenvolvimento de alho com a aplicação de três minerais: biotita, nefelina e microclínio. Os autores obtiveram respostas distintas, com melhor crescimento ao se aplicar biotita; os resultados foram intermediários com a aplicação da nefelina e os piores resultados foram registrados com a aplicação do microclínio, contudo, estes resultados não diferiram estatisticamente do tratamento controle.

Em relação ao P, os solos avaliados apresentam condições iniciais distintas com relação aos teores deste nutriente, o solo de textura argila apresenta concentrações consideradas muito baixas, enquanto o solo de textura areia se enquadrou na faixa de fertilidade alta (SBCS/NEPAR, 2019) (Tabela 3). A diferença inicial na fertilidade poderia impactar no desenvolvimento das plantas de soja e milho cultivadas.

Os teores de P sofreram incrementos em ambos os solos para os tratamentos com remineralizador, independente da cultura semeada. Eles também apresentaram teores no solo nas doses mais altas, os quais foram superiores aos obtidos quando a adubação fosfatada foi realizada (Figura 3 A1, e C1). Os ganhos nesta variável na dose de 99 Mg ha<sup>-1</sup> melhoraram a fertilidade do solo, com teores de P inicialmente caracterizados com muito baixos (2,04 mg dm<sup>-3</sup>) para muito alto 12,2 mg dm<sup>-3</sup> (média das duas culturas) (SBCS/NEPAR, 2019). No solo de textura areia e que apresentava concentrações altas de P, o incremento deste nutriente pela aplicação do remineralizador, nos solos cultivados com soja ou milho, apresentou teores considerados muito altos ao final do experimento (SBCS/NEPAR, 2019).

A disponibilização direta de P ocorreu, mesmo com a aplicação do material que apresenta baixas concentrações do elemento em sua constituição (Tabela 1). As elevadas doses aplicadas promoveram um aporte significativo de P no solo. Na dose máxima aplicada (99 Mg ha<sup>-1</sup>) foram adicionados 381,6 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. Com as elevadas quantidades de P aplicadas, foram observados teores de P no solo considerados superiores aos obtidos pela aplicação da dose de 80 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para ambas as culturas e solos (Figura 3 A1 e C1). Em contrapartida, o milho no solo de textura areia e a soja no solo de textura argila alcançaram os valores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ora citados nas doses de 25 e 22 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente resultando na aplicação média de 91,6 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, demonstrando que, em alguns casos, pode existir uma relação bem próxima. Nos demais casos, as doses calculadas para atingir os teores no solo semelhantes ao tratamento adubado foram distantes, 49 e 3,9 Mg ha<sup>-1</sup>, referentes aos cultivos de soja em solo de textura areia e o milho em solo de textura argila.

É importante determinar se este fato realmente ocorre, mesmo sendo frequente a liberação de P por rochas basálticas, já que basaltos com mineralogia distinta, extraídos de regiões variadas, podem apresentar respostas distintas. Para basaltos de algumas regiões, a aplicação em doses elevadas pode ser suficiente para suprimir a necessidade de adubação fosfatada enquanto outros não (Lewis *et al.*, 2021).

Mesmo que o remineralizador tenha promovido aumento dos teores de P no solo, não ocorreram incrementos nos teores do nutriente no tecido vegetal. Pelo contrário, no solo textura areia, cujos teores estavam adequados de P no solo, ocorreu redução dos teores de P no tecido vegetal tanto da soja quanto do milho. Por conseguinte, os menores teores de P ficaram no tecido, quando comparados aos determinados para a testemunha com adubação fosfatada (Figura 3 A2 e C2).

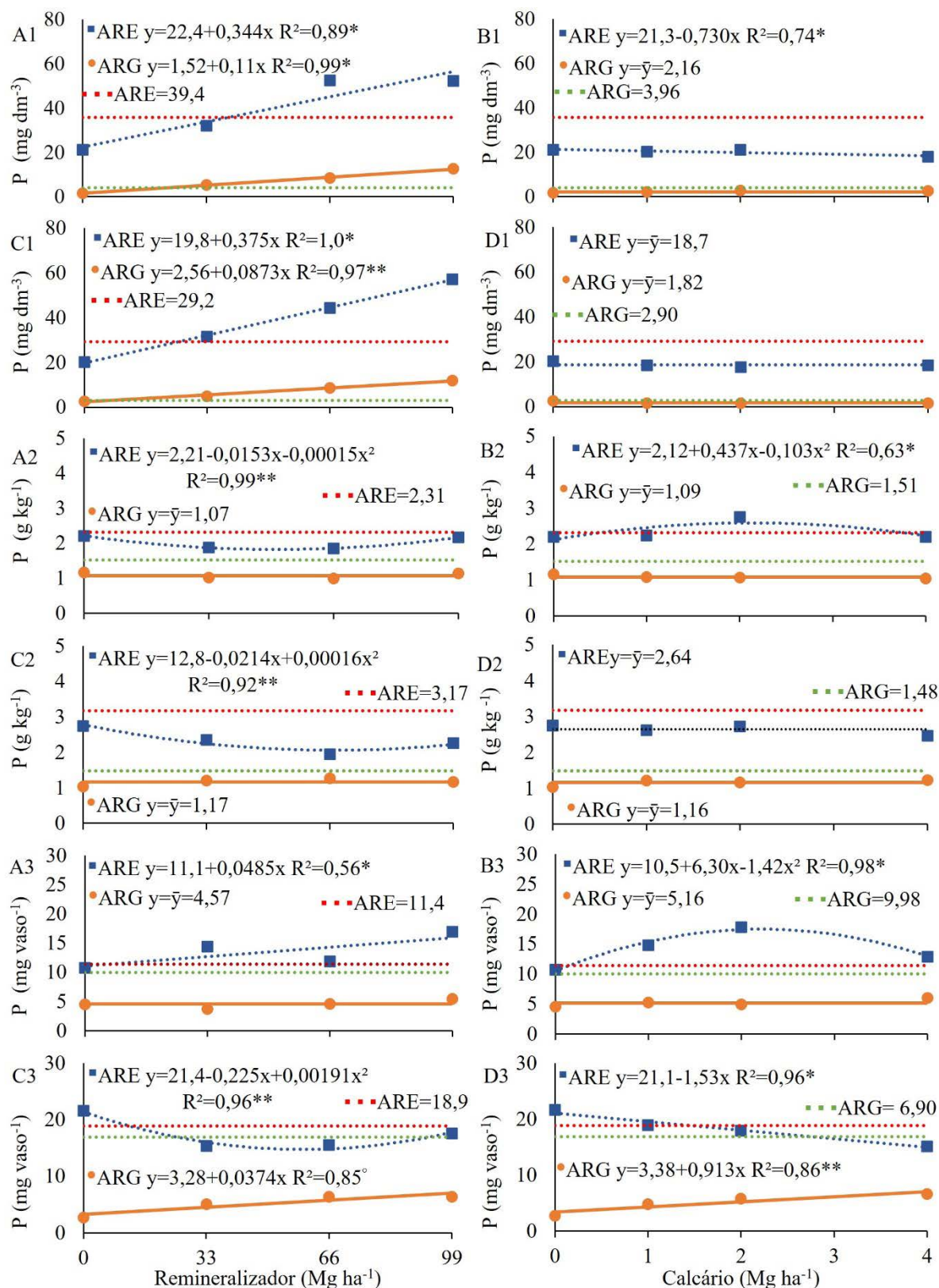


Para a cultura da soja, a redução dos teores de P no tecido vegetal ocorrido nos tratamentos com remineralizador pode ser devido a um efeito diluição, já que ocorreu maior extração de P do solo. Esta extração superou inclusive a extração de P, promovida pela testemunha adubada, contudo, a absorção da planta não foi suficiente para manter ou ampliar os teores deste nutriente na planta (Figura 3 A 2 e 3).

Embora a literatura demonstre que pode ocorrer a liberação de P pelo aumento do pH do sistema promovido pela aplicação de calcário (Mkonza; Buthelez-Dube; Muchaonnyerwa, 2020), em ambas as culturas, quando tratadas com calcário, não ocorreu aumento dos teores do nutriente no solo. Respostas quanto à disponibilização de P foram mais pontuais com a cultura da soja em solo de textura areia e apresentaram aumento dos teores de P no tecido foliar. O objetivo foi propiciar teores superiores do elemento no tecido aos analisados na testemunha adubada com superfosfato simples (Figura 3 B1 e B2), com este incremento e que resultou no aumento do P extraído (Figura 3 B3).

A liberação dos cátions Ca, Mg e K, advindos dos minerais silicatados, como é verificado, ocorre pelo intemperismo desses. Neste processo, ocorre a liberação de OH<sup>-</sup> e/ou consumo de H<sup>+</sup> no processo de intemperismo, que pode ser exemplificado pela reação  $KAlSi_3O_8 + H^+ \rightarrow HAlSi_3O_8 + K^+$  (Curi; Kämpf; Marques, 2005).

Assim, verifica-se pela literatura que as rochas silicáticas geram um lixiviado alcalino durante o intemperismo de seus minerais, os quais reduzem a acidificação do solo e promovem efeitos importantes na diminuição da disponibilidade de metais como o Al (Beerling *et al.*, 2018). Os resultados são tanto a diminuição do alumínio solubilizado quando existente (Anda; Shamshuddin; Fauziaa, 2015; 2013) quanto o aumento do pH do solo (Basak; Sarkar; Naidu, 2021; Luchese *et al.*, 2023a, 2021; Martins *et al.*, 2015; Souza *et al.*, 2017; Toscani; Campos, 2017;).



**Figura 3.** Teores de P no solo (1), na planta (2), e nutriente extraído (3) em função das doses aplicadas de remineralizador e calcário, com remineralizador na soja (A), calcário na soja (B), remineralizador no milho (C), calcário no milho (D), em solo com textura areia (ARE) e textura argila (ARG). ■ ■ ■ e ■ ■ ■ correspondem ao controle com  $P_2O_5$  no solo com textura areia e textura argila, respectivamente. \*\*, \* e ° indicam significância estatística de 1%, 5% e 10%, respectivamente.

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

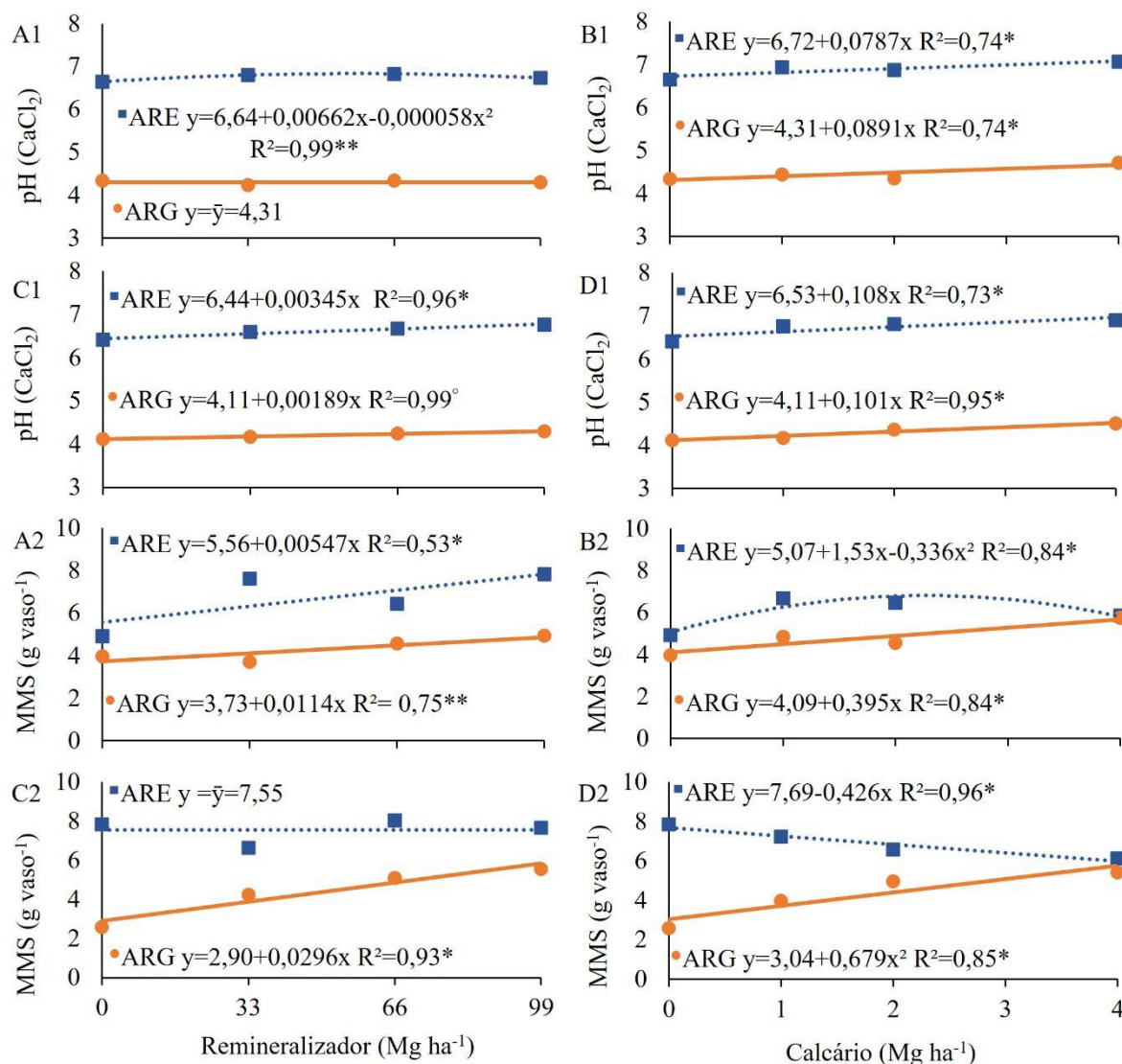
O efeito do remineralizador no que se refere ao pH ocorreu apenas no solo com textura areia, de menor CTC ( $4,27 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em que foram observados aumentos desta variável (Figura 4 A1 e C1).

No caso do solo com textura argila, de maior CTC ( $9,19 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), o efeito do material não foi suficiente para promover aumentos significativos. Pode-se verificar que, na cultura do milho, tem-se uma tendência de aumento do pH, quando comparado com o pH inicial (Tabela 3) e, nas doses mais altas, a aplicação do remineralizador não apresentou diminuição do pH inicial (Figura C1). A diminuição no pH é originada da aplicação de ureia como fonte nitrogenada na cultura do milho, sendo comprovada pelos coeficientes lineares das equações dos tratamentos que receberam calcário e remineralizador na cultura da soja com valores de 4,31, quando comparados aos tratamentos no milho com valores de 4,11 (Figura 4 A1, B1, C1 e D1).

As melhorias promovidas nos solos com a aplicação de ambos os materiais foram suficientes para melhorar o desenvolvimento das plantas cultivadas, como é verificado pela avaliação da massa de matéria seca (MMS). Assim, observa-se que a aplicação tanto de remineralizador quanto de calcário apresentaram respostas semelhantes. Em ambos os casos ocorreram incrementos da variável MMS para a cultura da soja em ambos os solos e para o milho apenas no solo de textura argila (Figura 4 A2, B2, C2 e D2).

Existem vários trabalhos que demonstram o efeito positivo da aplicação de pó de rocha no desenvolvimento das culturas. E, sabe-se que esta variável pode ser avaliada por meio da medição de altura, diâmetro ou massa seca das plantas (Anda; Shamshuddin; Fauziah, 2013; Crusciol *et al.*, 2019; Kelland *et al.*, 2020; Luchese *et al.*, 2023a, 2023b; Mancuso *et al.*, 2014; Medeiros *et al.*, 2021; Mohammed *et al.*, 2014; Moretti *et al.*, 2019; Souza *et al.*, 2017; Ramos *et al.*, 2022).

As respostas em MMS não foram positivas para o milho no solo de textura areia. Neste caso, a aplicação de calcário promoveu redução nesta variável (Figura 4 C2 e D2). É importante ressaltar que o solo de textura areia, embora não tenha os maiores teores de cátions em comparação ao solo de textura argila, apresentou maior saturação por base: 53 % contra 38 %, e pH mais elevado (Tabela 3). Neste mesmo tratamento com calcário ocorreu uma redução dos teores de K nas plantas (Figura 2 D2) com um incremento dos teores deste nutriente no solo (Figura 2 D1), que evidenciou menor absorção de K. A menor absorção do K pode estar vinculada ao aumento dos teores de Ca e Mg, os quais somaram  $4,75 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  (Figura 2 D1 e D2), quando analisados na maior dose. Fato que proporcionou uma relação  $(\text{Ca} + \text{Mg})/\text{K}$  de 55,2, cujo valor pode ser considerado elevado e reduzir os teores foliares de K (Oliveira; Carmello; Mascarenhas, 2001).



**Figura 4.** Variação da MMS (massa de matéria seca) (1) e pH do solo (2), em função das doses aplicadas de remineralizador e calcário, com remineralizador na soja (A), calcário na soja (B), remineralizador no milho (C), calcário no milho (D), em solo de textura areia (ARE) e textura argila (ARG). \*\*, \* e ° indicam significância estatística de 1%, 5% e 10%, respectivamente.

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O remineralizador promoveu ganhos significativos de MMS em função das doses aplicadas para soja em ambos os solos, e para milho, somente no solo com textura argila. Em contrapartida, o calcário apresentou ganhos nas mesmas condições, mas teve redução na MMS no solo de textura areia, cultivado com milho.

O remineralizador apresentou aumento dos valores de pH, principalmente no solo de textura areia com menor CTC. O calcário, de acordo com a característica de corretivo de acidez do solo, promoveu aumentos do pH do solo em todas as situações avaliadas.

No quesito dos macronutrientes catiônicos bivalentes, tanto o calcário quanto o remineralizador promoveram aumentos significativos nos teores de Ca em ambos os solos para ambas as culturas. Contudo, é evidente que a baixa concentração de Mg do calcário calcítico e a disponibilização mais lenta deste nutriente no remineralizador não promoveram resposta tão expressivas quanto as do Ca. Nos solos com textura

areia que receberam calcário, verifica-se a tendência da redução deste nutriente, enquanto o aumento do mesmo foi observado somente nos solos com textura argila, cultivados com milho independente do material aplicado.

O P é muito impactado pela aplicação do remineralizador, pois ocorrem aumentos deste nutriente de forma expressiva no solo. Contudo, os ganhos dos teores de fósforo no solo não promoveram aumentos mais expressivos nas demais variáveis analisadas e vinculadas a este nutriente. O calcário exerceu pequena influência na disponibilização de P, posto que foram verificados apenas incrementos nos teores do elemento no tecido vegetal da cultura da soja.

A liberação de K pelo remineralizador ocorre de forma lenta, a ponto de, na maioria dos tratamentos, ser suficiente somente para manter os teores do nutriente no solo quando a extração pela cultura aumenta em função das doses aplicadas, observando-se ganhos dos teores de K no solo quando a extração permanece constante. O mesmo não ocorreu nos vários tratamentos que receberam o calcário que tiveram reduções significativas de K no solo.

## REFERÊNCIAS

- ANDA, M.; SHAMSHUDDIN, J.; FAUZIAH, C. I. Improving chemical proprieties of a highly weathered soil using finely ground basalt rock. *Catena*, v. 124, p. 147-161, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.012>.
- ANDA, M., SHAMSHUDDIN, J.; FAUZIAH, C. I. Increasing negative charge and nutrient contents of a highly weathered soil using basalt and rice husk to promote cocoa growth under field conditions. *Soil and Tillage Research*, v. 32, p. 1-11, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.04.005>.
- BASAK, B. B.; SARKAR, B.; NAIDU, R. Environmentally safe release of plant available potassium and micronutrients from organically amended rock mineral powder. *Environ Geochem Health*, v. 43, p. 3273–3286, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00677-1>.
- BERGMANN, M.; SILVEIRA, C. A. P.; BAMBERG, A. L.; MARTINAZZO, R.; GRECCO, M. F. Considerações sobre o potencial de uso agrônômico das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral da Bacia do Paraná. In: HARTMANN, L.A.; SILVA, J.T. DA; DONATO, M. (Org.). *Tecnologia e Inovação em Gemas, Jóias e Mineração*. Porto Alegre: UFRGS, 2014, p. 119-126.
- BEERLING, D. J.; LEAKE, J. R.; LONG, S. P.; SCHOLES, J. D.; TON, J.; NELSON, P. N.; BIRD, M.; KANTZAS, E.; TAYLOR, L. L.; SARKAR, B.; KELLAND, M.; DELUIA, E.; KANTOLA, I.; MÜLLER, C.; RAU, G.; HANSEN, J. Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. *Nature Plants*, v. 4, p. 138–147, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0108-y>.
- CRUSCIOL, C. A. C.; MORETTI, L. G.; BOSSOLANI, J. W.; MOREIRA, A.; MICHERI, P. H.; ROSSI, R. Can Dunit Promote Physiological Changes, Magnesium Nutrition and Increased Corn Grain Yield? *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 50, p. 2343-2353, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1659304>.
- BRITO, R. S. D., BATISTA, J. F., MOREIRA, J. G. do V., MORAES, K. N. O.; Silva, S. O. da. Rochagem na agricultura: importância e vantagens para adubação suplementar. *South American Journal of Basic Education, Technical and Technological*, v. 6, n.1, 528-540, 2019. DOI: <https://periodicos.ufac.br/index.php/SAJEBTT/article/view/2331>



CURI, N.; KÄMPF, N.; MARQUES, J. J. (2005) Mineralogia e formas de potássio em solos do Brasil. In: Yamada, T.; Roberts, T. L. **Potássio na agricultura brasileira**. Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato: Piracicaba, Brasil, 71-92, 2005.

DALMORA, A.C.; RAMOS, C.G.; PLATA, L.G.; COSTA, M.L. da; KAUTZMANN R.M.; OLIVEIRA, L.F.S. Understanding the mobility of potential nutrients in rock mining by-products: An opportunity for more sustainable agriculture and mining. **Science of The Total Environment**, v. 10, 136240, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136240>.

DANIELL, A.; VAN TONDER, D. M. Opportunity for Increasing the Soil Quality of Non-arable and Depleted Soils in South Africa: a Review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition.**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01205-7>.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência Agrotecnológica**, v. 35, p. 039-1042, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>.

KAUTZMANN, R.M., OLIVEIRA, C., TAFFAREL, S., RAMOS, C.G., SYDNEY, S., SILVA, L.F.O., BORBA, R.F. Caracterização de pó de rocha vulcânica para uso em rochagem no nordeste do Rio Grande do Sul. In: Anais do XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, Goiânia – GO. 161-168, 2013.

KELLAND, M. E.; WADE, P. W.; LEWIS, A. L.; TAYLOR, L. L.; SARKAR, B.; ANDREWS, M. G.; LOMAS, M. R.; COTTON, T. E. A.; KEMP, S. J.; JAMES R. H.; PEARCE, C. R.; HARTLEY, S. E.; HODSON, M. E.; LEAKE, J. R.; BANWART, S. A.; BERLING, D. J. Increased yield and CO<sub>2</sub> sequestration potential with the C<sub>4</sub> cereal *Sorghum bicolor* cultivated in basaltic rock dust-amended agricultural soil. **Global Change Biology**, v. 26, p. 3658–3676, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15089>.

LEWIS, A. L.; SARKAR, B.; WADE, P.; KEMP, S. J.; HODSON, M. E.; TAYLOR, L. L.; YEONG, K. L.; DAVIES, K.; NELSON, P. N.; BIRD, M. I.; KANTOLA, I. B.; MASTERS, M. D.; DELUCIA, E.; LEAKE, J. R.; BANWART, S. A.; BEERLING, D. J. Effects of mineralogy, chemistry and physical properties of basalts on carbon capture potential and plant-nutrient element release via enhanced weathering. **Applied Geochemistry**, v. 132, 105023, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105023>.

LUCHESI, A.V.; LEITE, I.J.G.C.; GIARETTA, A.P.S.; ALVES, M.L.; PIVETTA, L.A.; MISSIO, R.F. Use of quarry waste basalt rock powder as a soil remineralizer to grow soybean and maize, **Heliyon**, v. 9, p. e14050, 2023a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14050>.

LUCHESI, A.V.; PIVETTA, L.A.; BATISTA, M.A.; STEINER, F.; GIARETTA, A.P.S.; CURTIS, J.C.D. Agronomic feasibility of using basalt powder as soil nutrient remineralizer. **African Journal of Agricultural Research**, v. 17, p. 487-497, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.15234>.

LUCHESI, A.V., LEITE, I.J.G. de C, ALVES, M.L. VIECELE, J.P. dos S; PIVETTA, L.A.; MISSIO, R. F. Can Basalt Rock Powder be Used as an Alternative Nutrient Source for Soybeans and Corn? **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, p. 4044-4054, 2023b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01322-3>.

MANCUSO, M.A.; SORATTO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C.; CASTRO, G.S.A. Effect of potassium sources and rates on arabica coffee yield, nutrition, and macronutrient export. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1448-1456, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000500010>.

MARTINS, V.; SILVA, D.R.G.; MARCHI, G.; LEITE, M.C.A.; MARTINS, É.S.; GONÇALVES, A.S.F.; GUILHERME, L.R.G. Effect of alternative multinutrient sources on soil chemical proprieties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 194-204, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20150587>.

MEDEIROS, D.S.; SANCHOTENE, D.M.; RAMOS, C.G.; OLIVEIRA, L.F.S.; SAMPAIO, C.H.; KAUTZMANN, R.M. Soybean crops cultivated with dacite rock by-product: A proof of a cleaner technology to soil remineralization. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, p. 106742, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106742>.

MKONZA, N.P.; BUTHELEZI-DUBE, N.N.; MUCHAONNYERWA, P. Effects of lime application on nitrogen and phosphorus availability in humic soils. **Scientific Reports**, v. 10, p. 8634, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65501-3>.

MOHAMMED, S.M.O.; BRANDT, K.; GRAY, N.D.; WHITE, M.L.; MANNING, D.A.C. Comparison of silicate minerals as sources of potassium for plant nutrition in sandy soil. **European Journal of Soil Science**, v. 65, p. 653-662, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12172>.

MORETTI, L.G.; BOSSOLANI, J.W.; CRUSCIOL, C.A.C.; MOREIRA, A.; MICHERI, P.H.; ROSSI, R.; IMAIZUMI, C. Dunite in Agriculture: Physiological Changes, Nutritional Status and Soybean Yield. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 50, p. 1775-1784, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1635143>.

SBCS/NEPAR. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/ Núcleo Estadual Paraná: Curitiba, 482p, 2019.

OELKERS, E. General kinetic description of multioxide silicate mineral and glass dissolution. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 65, p. 3703-3719, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00710-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00710-4).

OLIVEIRA, F. A. de; CARMELLO, Q. A. de C.; MASCARENHAS, H. A. A.. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-de-vegetação. **Scientia Agricola**, v. 58, p. 329-335, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000200016>.

PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F.; ZEMPULSKI, H.C.; MIYAZAWA, M. ZOCOLER, D.C. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade**. Circular Técnica, n. 76, p. 38, 1992.

RAMOS, C.G.; HOWER, J.C.; BLANCO, E.; OLIVEIRA, M.L.S., THEODORO, S.H. Possibilities of using silicate rock powder: An overview. **Geoscience Frontiers**, v. 13, p. 101185, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185>.

RAMOS, C. G.; QUEROL, X.; OLIVEIRA, M. L. S.; PIRES, K.; KAUTZMANN, R. M.; OLIVEIRA, L. F. S.. A preliminary evaluation of volcanic rock powder for application in agriculture as soil a remineralizer. **Science of the Total Environment**, v. 512- 513, p.371-380, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.070>.

SILVA, F.C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2nd ed.; Embrapa informação Tecnológica, Brasília, Brasil, 627p, 2009.

SILVA, R. C. da; CURY M. E; IEDA, J. J. C.; SERMARINI, R. A.; AZEVEDO A. C. Chemical attributes of a remineralized oxisol. **Ciência Rural**, v. 47, p. 2017. e20160982. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160982>.

SOUZA, F.; OLIVEIRA, C. G.; MARTINS, E. S.; ALVES, J. M. Efeitos condicionador e nutricional de um remineralizador de solos obtido de resíduos de mineração. **Agri-environmental Sciences**, v. 3, p. 1-14, 2017.

SWOBODA, P.; DÖRING, T.F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. **Science of the Total Environment**. v. 3 p. 807, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>.

TOSCANI, R. G. da S.; CAMPOS J. E. G. Uso de pó de basalto e rocha fosfatada como remineralizadores em solos altamente intemperizados. **Geociências**, v. 36, n. 2, p. 259-274, 2017.

ZHAO, X., GAO, S., LU, D., WANG, H., CHEN, X., ZHOU, J., ZHANG, L., 2019. Can potassium silicate mineral products replace conventional potassium fertilizers in rice–wheat rotation? **Agronomy Journal**. v. 111, p. 2075-2083. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2019.01.0020>.