

## EFEITOS CONDICIONADOR E NUTRICIONAL DE UM REMINERALIZADOR DE SOLOS OBTIDO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO<sup>1</sup>

Fred Newton da Silva Souza<sup>2</sup>, Claudinei Gouveia de Oliveira<sup>3</sup>,  
Éder de Souza Martins<sup>4</sup>, Juliana Mariano Alves<sup>5</sup>

### RESUMO:

Os altos custos dos fertilizantes e a necessidade de aumentar a eficiência do manejo da fertilidade dos solos agrícolas no Brasil têm incentivado a pesquisa de rochas silicáticas como fontes de nutrientes e condicionadores de solo. O presente estudo teve como objetivo avaliar um remineralizador de solos obtido a partir da moagem de resíduos minerais do Garimpo de Esmeraldas de Monte Santo-TO. O remineralizador contém, em sua composição química, K, Ca e Mg e outros elementos considerados micronutrientes para plantas cultivadas, e granulometria < 2,0 mm. O experimento foi conduzido em casa de vegetação com Neossolo Quartzarênico (RQ) de baixa fertilidade natural. O experimento consistiu na aplicação de doses crescentes do remineralizador no solo, definidas com base no teor total de K (50, 100, 150 e 300 mg kg<sup>-1</sup>) e os tratamentos adicionais testemunha+calagem e fonte solúvel de K (KCl). Foram avaliadas a disponibilidade de K, a influência nos demais atributos do solo, a produção de matéria seca e o acúmulo de nutrientes na parte aérea de milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.). A produção de matéria seca e a absorção de K pelas plantas foi crescente até a maior dose do remineralizador (300 mg kg<sup>-1</sup> de K). A aplicação de 6 Mg ha<sup>-1</sup> de remineralizador (161 mg kg<sup>-1</sup> de K) propiciou resultados semelhantes aos observados para o tratamento com fonte solúvel de K (KCl). O remineralizador foi uma fonte eficiente de K para o milheto, com índices de eficiência semelhantes àqueles obtidos com a fonte solúvel de K. Adicionalmente, a aplicação do remineralizador favoreceu a elevação do pH e da CTC do solo, o que proporciona maior eficiência às fontes solúveis de fertilizantes, geralmente importadas e de elevados custos financeiros.

**PALAVRAS-CHAVE:** eficiência agrônômica, nutrição mineral, remineralizador de solo

## CONDITIONING AND NUTRITIONAL EFFECTS OF A SOIL REMINERALIZER OBTAINED FROM MINING WASTE

### ABSTRACT:

The high cost of fertilizers and the need to increase the efficiency of the management of fertility of agricultural soils in Brazil have encouraged the research of silicate rocks as nutrients sources and as soil conditioners. This aimed to investigate the efficiency of soil remineralizers obtained from the milling of emerald mineral waste from Monte Santo-TO. The remineralizer has, in its composition, K, Ca and Mg, and other elements considered micronutrients for crops, and particle size <2.0 mm. The experiment, carried out in a greenhouse, involved a Quartzipsamment (RQ) of low natural fertility. The experiment consisted of the application to soil of increasing doses of the remineralizer, defined based on the total content of K (50, 100, 150 and 300 mg kg<sup>-1</sup> K) plus two additional treatments: control treatment + liming and soluble source of K (KCl). We evaluated the K availability and other soil properties, the dry matter production and nutrient accumulation in millet shoots (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.). The dry matter yield and K uptake by plants is increased up the higher dose of the remineralizer (300 mg kg<sup>-1</sup> K), the application of 6 Mg ha<sup>-1</sup> of the remineralizer (161 mg kg<sup>-1</sup> K) provided results similar to those observed for treatment with soluble source of K. The remineralizer constitutes an efficient source of K for millet, since the efficiency indexes were similar to those obtained with a soluble source of K. In addition, the conditioning effect of the remineralizer favors the increase of pH and soil CTC, providing greater efficiency to the soluble sources of fertilizers, which are usually imported and have high financial costs.

**KEYWORDS:** agronomic efficiency, mineral nutrition, soil remineralizer

1 - Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, do Instituto de Geociências, da Universidade de Brasília – IGD/UnB.

2 - Engenheiro Agrônomo, Dsc., Professor do Curso de Engenharia Agrônômica e Pesquisador do Núcleo de Desenvolvimento e Avaliação de Desempenho Ambiental – UNITINS/NUDAM, 108 Sul Alameda 11 Lote 03, CEP: 77020-122, Palmas (TO), Brasil. fred.ns@unitins.br

3 - Geólogo, Dsc., Professor Associado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília - IGD/UnB, Campus Darcy Ribeiro, CEP: 70910-900, Brasília-DF, Brasil. gouveia@unb.br

4 - Geólogo, Dsc., Pesquisador, Centro de Pesquisa Agropecuária do Cerrado, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - CPAC/Embrapa, Rodovia BR-020, Km 18, CEP: 73310-970, Planaltina-DF, Brasil. eder.martins@embrapa.br

5 - Engenheira Ambiental, Msc., Professora do Curso de Engenharia Agrônômica e Pesquisadora do Núcleo de Desenvolvimento e Avaliação de Desempenho Ambiental – UNITINS/NUDAM, 108 Sul Alameda 11 Lote 03, CEP: 77020-122, Palmas (TO), Brasil. junalves@hotmail.com

## INTRODUÇÃO

A limitada eficiência dos fertilizantes altamente solúveis nas condições de solos tropicais (Baligar et al., 2001), associada aos altos custos das matérias-primas no mercado internacional (Manning, 2010), têm motivado o desenvolvimento de novos produtos, pela indústria, menos solúveis e mais eficientes para as plantas. Os “fertilizantes de liberação lenta” são os mais adequados para condições tropicais, capazes de fornecer os nutrientes de acordo com as necessidades de cada fase dos cultivos, reduzindo-se as perdas por lixiviação e os custos econômicos associados ao emprego de fertilizantes (Jimenez Gómez, 1992).

Ao mesmo tempo, alternativas têm sido propostas para a restauração da fertilidade dos solos intemperizados a partir da adição de compostos inorgânicos naturais na forma de pó de rochas como corretivos e fertilizantes (Leonardos et al., 2000). A técnica da “rochagem”, ou remineralização de solos, está conceitualmente fundamentada no que Van Straaten (2002) refere como agrogeologia, ou estudos dos processos geológicos na formação dos solos, na manutenção dos agroecossistemas, e na utilização de rochas no manejo da fertilidade dos solos e como fontes de nutrientes para as plantas.

Dentre os vários materiais utilizados e pesquisados destacam-se determinadas rochas silicáticas multinutrientes (Hinsinger et al., 1996; Harley e Gilkes, 2000; Van Straaten, 2002), também definidas como agrominerais silicáticos. A utilização dessas rochas apresenta potencial de fornecer uma grande variedade de nutrientes para sistemas de produção agrícola, isolado ou em complementação aos fertilizantes solúveis (Resende et al., 2006; Guelfi-Silva et al., 2014), que normalmente só fornecem os macronutrientes principais N, P e K. Essas rochas são compostas por uma variedade de minerais como biotita, flogopita, feldspatoídes, feldspatos, minerais máficos, que apresentam teores consideráveis de K, Ca, Mg, Si e outros nutrientes (Nascimento e Lapido-Loureiro, 2004; Martins et al., 2008; Ribeiro et al., 2010; Guelfi-Silva et al., 2012).

Dependendo dos materiais utilizados (rochas e minerais) e dos fatores do solo e da planta, a remineralização do solo pode traduzir as seguintes funções: correção da acidez; fonte de nutrientes; e condicionamento do solo (Luz et al., 2010). Ainda, conforme a literatura (Nascimento e

Lapido-Loureiro, 2004; Van Straaten, 2006; Martins et al., 2010), o principal interesse volta-se à obtenção de fontes alternativas de nutrientes. No entanto, com a Lei Nº 12.890 (Brasil, 2013), tais materiais passaram a ser enquadrados como remineralizadores de solos, com efeitos no fornecimento de nutrientes para as plantas e na melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas do solo.

De todo modo, os resultados das pesquisas indicam que a eficiência agrônômica das rochas silicáticas depende da sua origem, mineralogia e composição química, bem como de fatores associados a características do solo, do tempo de incubação ao solo, do tratamento prévio aplicado, e também, das espécies cultivadas (Nascimento e Lapido-Loureiro, 2004; Resende et al., 2006, 2012; Guelfi-Silva et al., 2012, 2014). Isso dificulta a determinação das relações de causa-resposta e a definição das doses a serem aplicadas, e em parte contribui para explicar os resultados pouco expressivos de alguns experimentos: material quimicamente pobre; curto período das experiências e custos elevados (Winiwarter e Blum, 2008).

Todavia, como bem aponta Leonardos et al. (2000), o aspecto mais criticado do uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes, a baixa solubilidade, compreende, na verdade, uma grande vantagem para a agricultura tropical, onde a interação de fatores do solo (baixa capacidade de troca de cátions) e do clima (alta pluviosidade) tornam os nutrientes provenientes dos fertilizantes solúveis mais suscetíveis à lixiviação. Neste sentido, Martins et al. (2010) acrescentam que tal característica é positiva, pois além de proporcionar efeitos residuais em cultivos sucessivos, também promove elevação da CTC resultante da formação de minerais secundários, reduzindo as perdas por lixiviação dos nutrientes na solução do solo.

A partir dessas considerações, e com base nas características física, mineralógica e química dos resíduos minerais provenientes do Garimpo de Esmeraldas de Monte Santo-TO, sua aplicação direta ao solo apresenta potencial de uso como remineralizador de solos. O presente estudo tem por objetivo avaliar os efeitos iniciais e residuais desse ‘remineralizador’ sobre os atributos do solo, a biodisponibilidade de K, Ca e Mg, bem como os efeitos comparativos aos obtidos com fontes minerais solúveis em ciclos de cultivos sucessivos de milho, sob condições controladas em casa de vegetação.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Características do remineralizador e do solo utilizado no experimento

O remineralizador foi obtido a partir da coleta, homogeneização e moagem de uma pilha de resíduos minerais gerados no Garimpo de Esmeraldas de Monte Santo, Tocantins. Tais resíduos são formados por rochas vulcânicas máfico-ultramáficas da Sequência Metavulcano-Sedimentar Rio do Coco (Frasca e Araújo, 2001), predominantemente, biotita gnaisse e anfíbolito. As análises petrográfica e textural realizadas no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IGD/UnB) revelaram a seguinte composição modal (% em massa): rocha biotita gnaisse composta por plagioclásio (70 %), biotita (17 %), granada (7 %), microclínio (4 %), e quartzo e calcita como minerais acessórios; rocha anfíbolito composta de hornblenda (65 %), biotita (25 %), plagioclásio (4 %), calcita (3 %), além de clorita e quartzo.

Após a moagem dos resíduos em uma indústria de calcário, os elementos contidos no material foram determinados por espectrometria de emissão ótica (ICP-OES) e de massa (ICP-MS) no Acme Analytical Laboratories. Os procedimentos laboratoriais envolveram moagem e abertura das amostras mediante fusão com metaborato ou tetraborato de lítio e digestão com ácido nítrico. A composição geoquímica de elementos maiores é resumida na Tabela 1. Outros elementos considerados micronutrientes ocorreram nos seguintes teores ( $\text{mg dm}^{-3}$ ): Mo (2,8); Cu (27,0); Zn (53,0); Co (34,3); B (3,0). Os teores de elementos potencialmente tóxicos foram baixos (Brasil, 2006): Cd ( $<0,1 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e Pb ( $3,2 \text{ mg dm}^{-3}$ ). O material moído apresentou 99,8 % de partículas  $< 0,8 \text{ mm}$  e 85,6 %  $< 0,3 \text{ mm}$ . Com essas características o material preenche todas as especificações e garantias estabelecidas na Instrução Normativa MAPA Nº 05 para enquadramento, registro e comercialização de remineralizadores de solo (Brasil, 2016).

**Tabela 1.** Teores dos elementos maiores totais na forma de óxidos no remineralizador de solos proveniente do Garimpo de Esmeraldas de Monte Santo, TO

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	PF <sup>(1)</sup>	C <sup>(2)</sup>	S <sup>(3)</sup>	Soma <sup>(4)</sup>
%												
50,9	13,0	8,6	9,8	7,9	3,0	2,2	0,1	0,2	3,2	0,5	0,1	99,7

<sup>1</sup>perda ao fogo, relativo ao teor total de voláteis (CO<sub>2</sub> + SO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O); <sup>2</sup>carbono total medido pelo Leco; <sup>3</sup>enxofre total medido pelo Leco; <sup>4</sup>soma relativa aos óxidos e à PF.

O solo utilizado no experimento é um Neossolo Quartzarênico - RQ (Embrapa, 2013), no qual predominam características herdadas de quartzitos, pouco evoluídos, geralmente profundos e de alta permeabilidade, com baixa saturação por bases, elevada acidez e altos teores de alumínio trocável.

Na Tabela 2 é apresentada a caracterização do solo,

obtida por meio de análises empregadas na avaliação para fins agrônômicos, realizadas no Laboratório de Solos da Embrapa Cerrados (Embrapa, 2011; Rajj et al., 2001). A composição mineralógica, determinada a partir da análise de difratometria de raios-X no Laboratório de Raios-X do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, revelou presença de caulinita, gibbsita e quartzo.

**Tabela 2.** Características do Neossolo Quartzarênico (RQ) na camada de 0-20 cm de profundidade.

Classe	Mineralogia <sup>(1)</sup>	Areia <sup>(2)</sup>	Argila	MO <sup>(3)</sup>	pH <sup>(4)</sup>	K <sup>+</sup> <sup>(5)</sup>	Ca <sup>++</sup> <sup>(6)</sup>	Mg <sup>++</sup> <sup>(6)</sup>	V	m
RQ	Ct/Qz/Gb	dag kg <sup>-1</sup>			H <sub>2</sub> O	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			%	
		86,0	12,0	2,0	4,7	0,04	0,4	0,1	14,1	67

<sup>1</sup> Difratometria Raio-X: Ct-Caulinita, Qz-Quartzo, Gb-Gibbsita; <sup>2</sup> Embrapa (1997); <sup>3</sup> Oxidação via úmida; <sup>4</sup> pH em H<sub>2</sub>O 1:2,5; <sup>5</sup> Mehlich-1; <sup>6</sup> KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; V (saturação de bases); m (saturação de alumínio).

## Composição dos tratamentos e parâmetros avaliados

O experimento foi conduzido em delineamento experimental em blocos casualizados, composto de sete tratamentos e três repetições. Os tratamentos foram definidos de modo a permitir contrastes e servirem de referência para aferir a eficiência relativa do remineralizador. A Tabela 3 resume os tratamentos avaliados: testemunha+calagem; completo 150K que corresponde a aplicação de fonte solúvel de K (KCl) na dose de 150 mg kg<sup>-1</sup>, calagem e demais nutrien-

tes; completo sem a fonte solúvel de K (0 mg kg<sup>-1</sup>) mais calagem e demais nutrientes; e o remineralizador como fonte de K em doses crescentes equivalentes a 50, 100, 150 e 300 mg kg<sup>-1</sup> de K, mais calagem e demais nutrientes.

No cálculo das quantidades do remineralizador foi considerado o seu teor total de K, ou seja, 18,3 g kg<sup>-1</sup> (22,1 g kg<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O). Assim, as quantidades do remineralizador calculadas para os tratamentos (50, 100, 150 e 300 mg kg<sup>-1</sup> de K) equivaleram a aplicações de 5,5, 11,0, 16,5 e 33 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, considerando a massa de solo de 0,00-0,20 m de profundidade.

**Tabela 3.** Tratamentos aplicados na avaliação do potencial do remineralizador sobre a disponibilidade de nutrientes no solo e no crescimento e nutrição de plantas de milho cultivadas em Neossolo Quartzarênico.

Tratamento	Dose de K (mg kg <sup>-1</sup> )	Corretivo	KCl	Outros <sup>(1)</sup>
Com plantas – efeitos na nutrição e produção de matéria seca				
1. Testemunha + calagem	0	+	-	-
2. Completo 150K + calagem + outros	150	+	+	+
3. Completo – potássio + calagem + outros	0	+	-	+
4. Remineralizador 50K + calagem + outros	50	+	-	+
5. Remineralizador 100K + calagem + outros	100	+	-	+
6. Remineralizador 150K + calagem + outros	150	+	-	+
7. Remineralizador 300K + calagem + outros	300	+	-	+

<sup>1</sup>Outros: Nitrogênio (N); Fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>); Micronutrientes (Zn, Mn, Co, Cu e Mo); com (+) e sem (-) os nutrientes.

A fim de satisfazer as condições adequadas ao cultivo em vasos (Novais et al., 1991), utilizou-se adubação padrão via reagentes P.A. com N, P, S, B, Cu, Mn, Zn e Mo nas quantidades de 325, 250, 30, 0,5, 2, 3, 4 e 0,25 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Foi realizada aplicação da mistura CaCO<sub>3</sub> + MgO (P.A.) na proporção 3:1 para elevar a saturação por bases a 60 % (V) e para o suprimento de Ca e Mg. O nitrogênio foi aplicado em cobertura (50 mg kg<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>), aos 15 e aos 30 dias após a semeadura.

O solo foi coletado na profundidade de 0,00-0,20 m, sendo posteriormente destorroado e retiradas raízes e demais fragmentos. Em seguida, o solo foi dividido em subamostras de 8,3 kg, e nessas aplicados os tratamentos que permitem inferir os efeitos do remineralizador sobre os atributos do solo e na nutrição e crescimento das plantas.

Depois da aplicação e acondicionamento dos tratamentos em vasos, esses foram umedecidos até atingir 80 % da capacidade de campo estimada (0,135 kg kg<sup>-1</sup>), e assim mantidos incubados por 30 dias. Após esse período foram coletadas amostras para avaliação dos efeitos iniciais dos tratamentos sobre os atributos físico-químicos do solo. Os teores de K no solo foram determinados com o extrator

Mehlich-1, e demais parâmetros conforme procedimentos metodológicos descritos em Silva (2009).

Como planta teste foi utilizado milho (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), por tratar-se de uma espécie que apresenta elevada capacidade de absorção e ciclagem de nutrientes (Rosolem et al., 2005; Torres e Pereira, 2008). Após a semeadura, transcorridos 10 dias, realizou-se o desbaste mantendo-se 15 plantas por vaso.

O corte das plantas foi realizado 60 dias após o plantio, momento em que pelo menos 50 % das plantas apresentava florescimento. As plantas foram pesadas e submetidas à secagem em uma estufa de circulação de ar forçada (60 °C) por 72 h para determinação da matéria seca da parte aérea (MSPA). Amostras da MSPA de cada tratamento foram submetidas à análise de tecido vegetal (Malavolta et al., 1997) para quantificação dos teores de nutrientes absorvidos e acumulados em resposta aos tratamentos.

No segundo cultivo foi realizada apenas uma adubação de cobertura aos 20 dias após o plantio (100 mg kg<sup>-1</sup> de N). Todos os demais procedimentos de condução e avaliação foram iguais àqueles descritos para o cultivo anterior.

A partir dos dados de absorção de K, produção de matéria seca, e teores de nutrientes no solo, conforme descrito em Moll et al. (1982), foram determinados os índices de eficiência de absorção (EA), de utilização (EU), do fertilizante (EF), e de eficiência agrônômica (IEA):

$$EA = (K \text{ acumulado}_{\text{PlantaTeste}} / K \text{ aplicado}_{\text{Tratamento}})$$

$$EU = (\text{Massa seca}_{\text{PlantaTeste}} / K \text{ acumulado}_{\text{PlantaTeste}})$$

$$EF = (\text{Massa seca}_{\text{PlantaTeste}} / K \text{ aplicado}_{\text{Tratamento}})$$

$$IEA = 100 * (\text{Massa seca}_{\text{Rocha}} - \text{Massa seca}_{\text{Teste}}) / (\text{Massa seca}_{\text{Completo}} - \text{Massa seca}_{\text{Teste}})$$

Os dados dos atributos do solo e de produção e composição da matéria seca foram submetidos à análise de variância, sendo o efeito das fontes de K avaliado pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) e as respostas às doses do remineralizador avaliadas por regressão. As análises foram realizadas com o auxílio do Programa Estatístico SISVAR (Ferreira, 2011).

**Tabela 4.** Médias para atributos químicos do Neossolo Quartzarênico após aplicação e incubação por 30 dias do remineralizador e demais tratamentos.

Tratamento	pH	K	Ca	Mg	CTC
		----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			
Solo	4,7	0,04	0,4	0,1	2,4
1. Testemunha + calagem	7,0 a	0,07 b	2,4 c	0,8 b	3,6 d
2. Completo 150K + calagem + outros	6,4 c	0,52 a	4,1 b	0,7 b	5,9 c
3. Completo – potássio + calagem + outros	6,0 e	0,06 b	6,9 a	1,1 a	9,3 a
4. Remineralizador 50K + calagem + outros	5,4 f	0,06 b	5,0 b	0,4 c	7,7 b
5. Remineralizador 100K + calagem + outros	6,1 d	0,07 b	6,4 a	1,1 a	10,0 a
6. Remineralizador 150K + calagem + outros	6,4 c	0,08 b	6,5 a	0,8 b	9,0 a
7. Remineralizador 300K + calagem + outros	6,6 b	0,16 b	6,7 a	0,9 a	9,5 a
CV (%)	1,7	21,8	19,2	17,9	11,4
Média Geral	6,3	0,14	5,4	0,8	7,9

Médias seguidas pelas mesmas letras, na mesma coluna, não diferem entre si, teste Tukey (1953), 5% probabilidade.

Os efeitos da aplicação de doses crescentes do remineralizador (Tratamentos 4, 5, 6 e 7) não foram significativos sobre a liberação e disponibilidade inicial de K, como também verificado por Resende et al. (2006). De todo modo, cumpre destacar que, a máxima disponibilidade de K (0,16 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) obtida com a aplicação de 300 mg kg<sup>-1</sup> de K via remineralizador (Tratamento 7) representa mais do que o dobro do teor correspondente à reserva prontamente disponível no solo sob aplicação de calagem (0,07 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), e cerca de 30 % dos teores

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Efeitos iniciais do remineralizador nos atributos do solo

Os resultados que expressam os efeitos iniciais da aplicação dos tratamentos e incubação ao solo por 30 dias são apresentados na Tabela 4. Mesmo com o aumento no pH (6,0) decorrente da calagem (Tratamento 1), ocorreu baixa disponibilidade de K (0,07 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), o que comprova tratar-se de um solo cuja mineralogia apresenta reduzida reserva de K. Os efeitos positivos do remineralizador como corretivo de acidez e fonte de cálcio e magnésio são observados pela comparação com os atributos originais do solo (Tabela 2). O aumento da dose do remineralizador (Tratamentos 4, 5, 6 e 7) resultou em efeito significativo sobre o aumento do pH do solo (5,4 a 6,6), da disponibilidade de Ca (5,0 a 6,7 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e Mg (0,4 a 1,1 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e da capacidade de troca catiônica (> 7,7 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>).

disponibilizados com a aplicação da fonte solúvel (0,52 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>).

Ainda que o aumento da dose do remineralizador não tenha resultado com efeito significativo na disponibilidade imediata de K no solo, a partir dos valores de referência para a recomendação de adubação propostos por Raij et al. (2001), cujos níveis adequados de disponibilidade de K situam-se entre 0,08 e 0,21 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, o remineralizador apresenta potencial de suprimento nutricional de K para muitas culturas agrícolas.

Acrescenta-se, como bem apontam Hinsinger e Jaillard (1993), que em se tratando de um sistema fechado, sem lixiviação ou exportação via colheita, a liberação do K é limitada pela saturação de diferentes espécies iônicas em solução, porém, com o início do cultivo, a absorção de nutrientes pelas plantas favorece as reações de dissolução mineral e o incremento na disponibilidade de K ao longo dos cultivos. Assim, como o observado por Guelfi-Silva et al. (2012), que avaliaram diferentes rochas silicáticas, inclusive uma biotita xisto, o remineralizador em estudo apresenta efeitos significativos no fornecimento de nutrientes e nos atributos químicos do solo.

## Efeitos sobre o crescimento e a absorção de nutrientes pelas plantas

A partir dos dados de produção de MSPA registrados em ambos os cultivos (Tabela 5) nota-se que a deficiência de potássio no solo (Tabela 4) constitui fator limitante do crescimento e desenvolvimento das plantas de milho (Tratamentos 1 e 3). Conforme sugerido por Resende et al. (2012), tais condições permitiram evidenciar os efeitos potenciais do uso do remineralizador em comparação à fonte solúvel de K ou pelo aumento da dose aplicada (Tratamentos 4, 5, 6 e 7).

**Tabela 5.** Médias de produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) do milho para os diferentes tratamentos, em dois ciclos de cultivo em Neossolo Quartzarênico.

Tratamento	Ciclo 1	Ciclo 2	Acumulado
MSPA (g vaso <sup>-1</sup> )			
1. Testemunha + calagem	10,8 e	7,0 d	17,8 d
2. Completo 150K + calagem + outros	52,2 b	20,3 c	72,5 b
3. Completo – potássio + calagem + outros	11,2 e	7,0 d	18,3 d
4. Remineralizador 50K + calagem + outros	25,2 d	24,9 b	50,1 c
5. Remineralizador 100K + calagem + outros	42,8 c	24,3 b	71,9 b
6. Remineralizador 150K + calagem + outros	48,6 b	27,0 b	75,7 b
7. Remineralizador 300K + calagem + outros	60,0 a	38,7 a	98,6 a
CV (%)	11,1	6,2	6,1
Média Geral	36,5	21,3	57,8

Médias seguidas pelas mesmas letras, na mesma coluna, não diferem entre si, teste Tukey (1953), 5% probabilidade.

No primeiro ciclo de cultivo a produção de matéria seca resultante da aplicação do remineralizador (48,6 g vaso<sup>-1</sup>) foi estatisticamente igual à obtida com a fonte solúvel de K (52,2 g vaso<sup>-1</sup>), mas houve efeito significativo resultante do aumento da dose do remineralizador. No segundo cultivo a produção de matéria seca foi em geral menor que no cultivo inicial (Tabela 5), mas o efeito resultante da aplicação do remineralizador (Tratamento 6) foi significativamente maior que o registrado com a fonte solúvel (Tratamento 2), e manteve-se os efeitos das doses crescentes do remineralizador. Tais resultados evidenciam os efeitos residuais positivos do remineralizador no suprimento de K e na produção de MSPA das plantas de milho.

Os teores de nutrientes na MSPA das plantas de milho (Tabela 6), referentes ao primeiro e segundo cultivos, corroboram para as constatações referentes aos efeitos iniciais dos tratamentos sobre a disponibilidade de nutrientes no

solo e desenvolvimento das plantas. Os resultados mostraram que o remineralizador libera K, Ca e Mg em formas assimiláveis pelas plantas, com efeitos sobre a produção de MSPA das plantas de milho, em níveis compatíveis aos registrados com a aplicação da fonte convencional de K (Tratamento 2).

Além do remineralizador estudado apresentar composição multinutrientes, verificou-se relação positiva entre a produção de matéria seca, a absorção de K pelas plantas e a quantidade aplicada do remineralizador. Resende et al. (2012) atesta a dificuldade experimental de isolar os efeitos dos outros nutrientes em fontes complexas como os remineralizadores obtidos de rochas silicáticas. Desta forma, o desenvolvimento das plantas aferido pela produção de matéria seca não pode ser atribuído somente ao efeito decorrente do fornecimento de K, mas também de outros nutrientes presentes no remineralizador.

**Tabela 6.** Teores de macronutrientes absorvidos na parte aérea do milho em resposta aos tratamentos aplicados em Neossolo Quartzarênico.

Tratamento	Teor (g kg <sup>-1</sup> )					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Ciclo 1						
1. Testemunha + calagem	30,3 a	1,1 d	5,1 e	13,2 b	6,6 a	4,5 a
2. Completo 150K + calagem + outros	25,6 a	4,9 c	18,3 b	7,1 e	3,1 e	3,9 a
3. Completo – potássio + calagem + outros	31,0 a	7,0 a	4,8 e	9,6 d	5,2 c	4,1 a
4. Remineralizador 50K + calagem + outros	27,5 a	7,2 a	9,2 d	13,6 a	6,9 a	5,2 a
5. Remineralizador 100K + calagem + outros	27,3 a	6,4 b	13,2 c	11,7 b	6,4 b	4,7 a
6. Remineralizador 150K + calagem + outros	26,8 a	6,4 b	17,2 b	10,2 c	6,4 b	4,5 a
7. Remineralizador 300K + calagem + outros	25,7 a	5,6 b	23,3 a	10,2 c	4,4 d	4,3 a
Ciclo 2						
1. Testemunha + calagem	20,2 a	1,7 b	4,2 d	12,2 b	15,7 a	4,1 b
2. Completo 150K + calagem + outros	10,9 a	3,9 a	11,6 b	7,6 c	4,6 d	2,9 d
3. Completo – potássio + calagem + outros	13,2 a	5,3 a	3,1 e	14,4 a	10,0 b	2,0 e
4. Remineralizador 50K + calagem + outros	19,2 a	5,7 a	6,2 d	13,4 a	7,9 c	5,5 a
5. Remineralizador 100K + calagem + outros	14,7 a	5,3 a	7,9 c	11,0 b	6,4 c	4,6 b
6. Remineralizador 150K + calagem + outros	15,1 a	4,2 a	10,6 b	10,3 b	5,5 c	4,1 b
7. Remineralizador 300K + calagem + outros	11,3 a	3,9 a	19,9 a	7,5 c	4,1 d	3,7 c

Médias seguidas pelas mesmas letras, na mesma coluna, não diferem entre si, teste Tukey (1953), 5% probabilidade.

A concentração dos nutrientes analisados neste estudo situou-se próxima aos valores de referência encontrados na literatura (Braz et al., 2004; Prado e Vidal, 2008): N (12 a 36); P (0,4 a 3,3); K (14 a 38); Ca (3 a 10,8); Mg (0,7 a 5,1). Isso confirma que a capacidade de suprimento de K pelo remineralizador não promoveu consumo de luxo pelas plantas (Malavolta et al., 1997; Rosolem et al., 2005), em parte devido ao melhor equilíbrio nutricional favorecido pelos efeitos positivos do remineralizador.

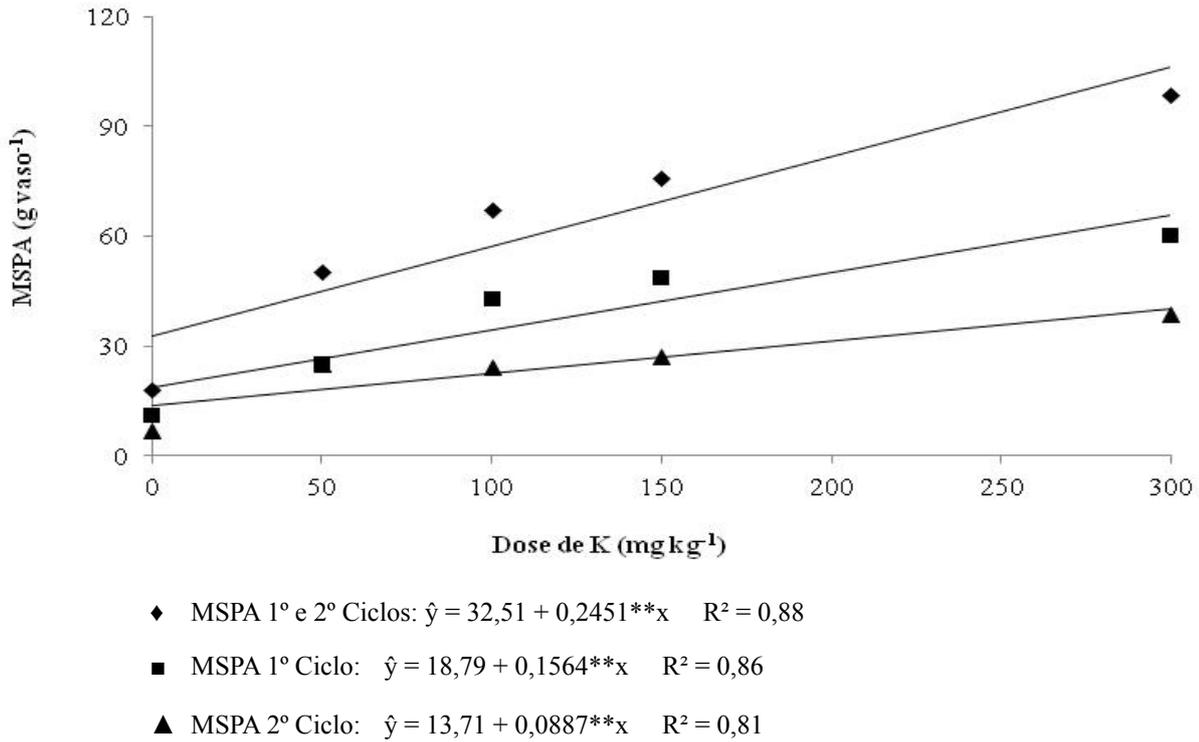
Os efeitos significativos no incremento na produção de MSPA (Figura 1) e na absorção de K (Figura 2) pelas plantas de milho em resposta às doses crescentes do remineralizador, à semelhança dos resultados descritos na literatura (Harley e Gilkes, 2000), revela que o ponto de equivalência em relação à fonte convencional de K (Tratamento 2) foi obtido com a aplicação de 6 Mg ha<sup>-1</sup> do remineralizador (161 mg kg<sup>-1</sup> de K).

Esses resultados demonstram que o remineralizador avaliado tem potencial como fonte de K. Todavia, em se tratando de um material de composição multimineral e multinutriente, conforme já apontado, os efeitos positivos do remineralizador podem estar relacionados a outros ele-

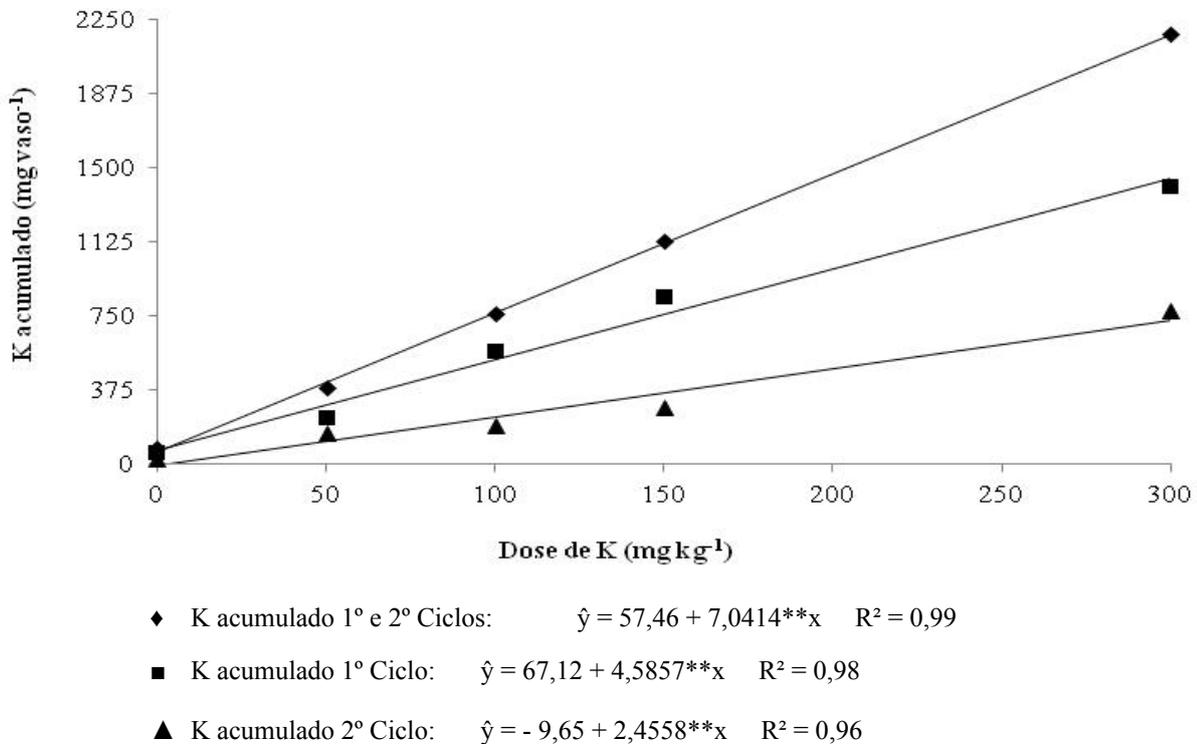
mentos de nutrição das plantas. De qualquer maneira, reconhece-se que os efeitos do remineralizador extrapolam as respostas observadas com a fonte convencional de K, especialmente pelos benefícios aditivos, como o melhor equilíbrio nutricional e condicionamento do solo.

Comparativamente à resposta obtida com a aplicação de 150 mg kg<sup>-1</sup> de K via fonte convencional de K (Tratamento 2), a aplicação do remineralizador (Tratamento 6) acumulou 12 % menos K, e produziu 7 % menos matéria seca no primeiro ciclo (Figura 3). No segundo cultivo (Figura 4) o mesmo tratamento com remineralizador produziu 33 % mais matéria seca, e acumulou 22 % mais K do que o obtido com a fonte convencional de K (Tratamento 2). No balanço geral, o remineralizador produziu 9 % mais biomassa, e acumulou apenas 6 % menos K.

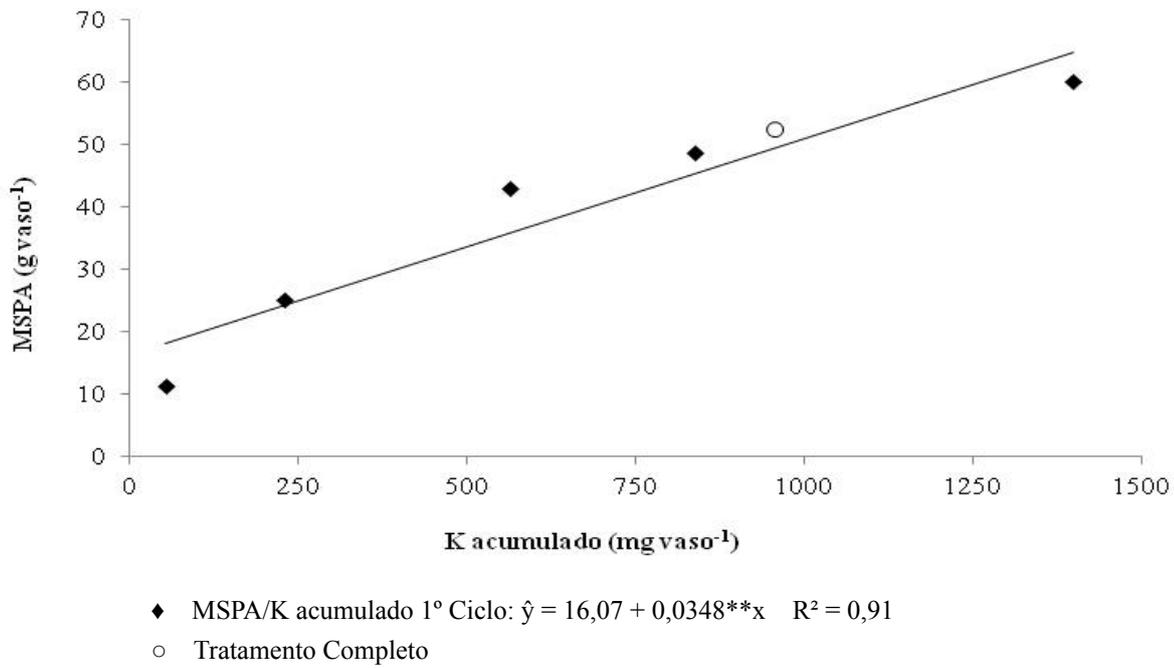
Os resultados apresentados permitem duas importantes constatações: em ambos os cultivos a absorção de K liberado do remineralizador apresentou estreita relação com a produção de matéria seca; e seus efeitos em cultivos sucessivos, comparados com a fonte solúvel, apresentou menor redução na produção de matéria seca e manteve os teores de K absorvidos.



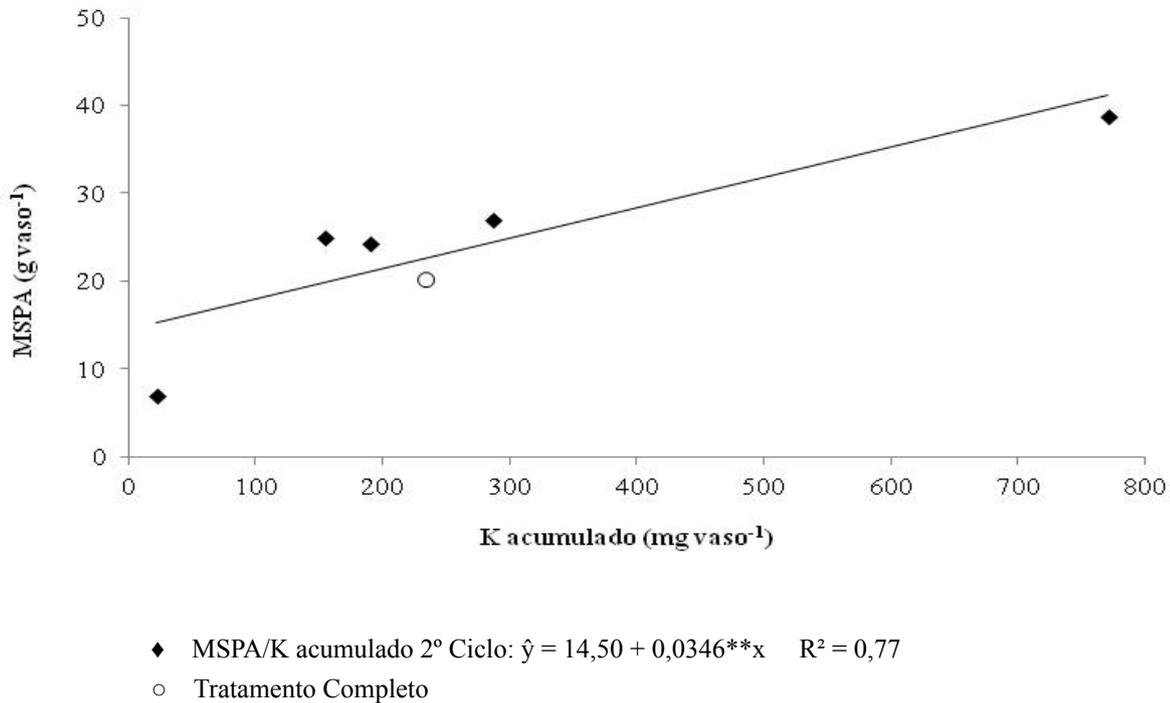
**Figura 1.** Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) do milho no primeiro e segundo ciclos e no acumulado em função de doses crescentes de K via remineralizador, cultivado em Neossolo Quartzarênico. \*\*, significativo a 5%, teste t.



**Figura 2.** Quantidade de K acumulada pelas plantas de milho no primeiro e segundo ciclos e no total acumulado nos dois ciclos em função de doses crescentes de K via remineralizador. \*\*, significativo a 5%, teste t.



**Figura 3.** Relação entre quantidade de potássio acumulada pelo milho e produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) do primeiro cultivo em função da aplicação de doses crescentes do remineralizador, em Neossolo Quartzarênico. \*\*, significativo a 5%, teste t.



**Figura 4.** Relação entre quantidade de potássio acumulada pelo milho e produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) do segundo cultivo em função da aplicação de doses crescentes do remineralizador, em Neossolo Quartzarênico. \*\*, significativo a 5%, teste t.

Considerando que o requerimento de nutrientes para o crescimento de plantas com sistema radicular confinado (vasos) é muito maior que o exigido nos sistemas abertos em condições de lavoura (Novais et al., 1991), supõem-se que os efeitos do remineralizador vão além do simples fornecimento de K. Efeitos que podem favorecer a absorção de outros nutrientes devido ao estabelecimento de uma condição nutricional mais favorável ao crescimento das plantas.

### Eficiência relativa das fontes/doses

O conjunto dos dados de produção de matéria seca e de absorção de nutrientes permite ainda comparar os índices de eficiência dos tratamentos com doses crescentes do remineralizador em relação ao tratamento com fonte solúvel de K (Completo 150K), e com isso estimar os percentuais de recuperação dos nutrientes aplicados via remineralizador, e sua eficiência

agronômica.

A partir da extração do K oriundo das reservas originais do solo e da adubação realizada no Tratamento Completo (235,6 mg kg<sup>-1</sup> por vaso), a recuperação do nutriente aplicado via remineralizador após os cultivos sucessivos foi de 75%, 82%, 84% e 85 % nos tratamentos que receberam aplicações equivalentes a 50, 100, 150 e 300 mg kg<sup>-1</sup> de K, respectivamente (Tabela 7). Esses efeitos resultam da melhoria geral do ambiente de exploração radicular, com reflexos no desenvolvimento das plantas e na absorção de nutrientes. Resultados similares foram obtidos por Resende et al. (2006) na avaliação de diferentes rochas silicáticas (remineralizadores) aplicadas no cultivo de milho, em Latossolo Vermelho-Amarelo de Cerrado, onde registraram eficiência agrônômica entre 58 e 94 %, com incremento deste percentual em resposta ao aumento das doses.

**Tabela 7.** Índices de eficiência relativa do remineralizador de solos em relação às fontes solúveis obtidos com o cultivo do milho em Neossolo Quartzarênico.

Tratamento	Índices de Eficiência			
	Absorção (mg mg <sup>-1</sup> )	Utilização (mg mg <sup>-1</sup> )	Fertilizante (mg mg <sup>-1</sup> )	Agrônômica (%)
2. Completo 150K + calagem + outros	0,96	61	58	100
4. Remineralizador 50K + calagem + outros	0,93	130	121	69
5. Remineralizador 100K + calagem + outros	0,91	89	81	93
6. Remineralizador 150K + calagem + outros	0,90	67	61	104
7. Remineralizador 300K + calagem + outros	0,89	45	40	136

Os resultados obtidos com a aplicação de K via remineralizador (Tratamento 6) revelaram que o índice de eficiência de absorção foi pouco menor que o registrado no tratamento controle com fonte convencional de K (Tratamento 2). Por outro lado, o remineralizador apresentou melhores índices de eficiência de utilização do nutriente e do fertilizante, e conseqüentemente, de eficiência agrônômica no fornecimento de K para as plantas (Tabela 7). A eficiência agrônômica crescente do remineralizador sugere que a aplicação de doses elevadas pode ser vantajosa devido aos efeitos globais sobre os atributos do solo, nutrição das plantas e produção vegetal.

### CONCLUSÃO

O remineralizador avaliado apresentou viabilidade técnica como fonte de K, Ca e Mg, com aumento do pH e da CTC do solo, e no desenvolvimento das plantas de milho.

A aplicação de 6 Mg ha<sup>-1</sup> de remineralizador proporcionou efeitos compatíveis com a fonte solúvel de K (360 kg ha<sup>-1</sup> de KCl) em cultivos sucessivos de milho.

Os índices de eficiência de uso do remineralizador foram compatíveis aos obtidos com a aplicação da fonte solúvel de K (cloreto de potássio).

O efeito residual do remineralizador em cultivos sucessivos sugere que o uso eficiente do mesmo deve levar em conta o período de cultivo ou número de safras em que são verificados índices satisfatórios de produtividade, bem como o prazo de amortização dos custos associados.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baligar, V.C.; Fageria, N.K.; He, Z.L. (2001). Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 32(7-8): 921-950. <http://dx.doi.org/10.1081/CSS-100104098>

BRASIL. (2006). **Instrução Normativa SDA/MAPA N° 27**. Dispõe sobre a importação ou comercialização, para produção, de fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes. Publicado no DOU em 9 de junho de 2006.

- BRASIL. (2013). **Lei Nº 12.890**. Altera a Lei no 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências. Publicado no DOU em 11 de dezembro de 2013.
- BRASIL. (2016). **Instrução Normativa MAPA Nº 05**. Estabelece as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. Publicado no DOU em 14 de maio de 2016.
- Braz, A.J.B.P.; Silveira, P.M.; Kliemann, H.J. & Zimmermann, F.J.P. (2004). Acumulação de nutrientes em folhas de milho e dos capins braquiária e mombaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 34(2):83-87.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (2011). **Manual de métodos de análise de solo** 2ª. ed revista. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS. 230 p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. (1997). **Manual de métodos de análise de solo** 2ª. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS. 212 p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. (2013). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-SPI; 2013. 353 p.
- Ferreira, D.F. (2011). Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia** 35(6): 1039-1042.
- Frasca, A.A. & Araújo, V.A. (2001). **Projeto Hidrogeologia no Tocantins – Folha Palmas (TO) – SD.22-Z-B**. CPRM.
- Guelfi-Silva, D.R.; Marchi, G.; Spehar, C.R.; Guilherme, L.R.G.; Rein, T.A.; Soares, D.A. & Ávila, F.W. (2012). Characterization and nutrient release from silicate rocks and influence on chemical changes in soil. **Revista Brasileira de Ciência de Solo** 36(3):951-62. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000300025>
- Guelfi-Silva, D.R.; Spehar, C.R.; Marchi, G.; Soares, D.A.; Cancellier, E.L. & Martins, E.S. (2014). Yield, nutrient uptake and potassium use efficiency in rice fertilized with crushed rocks. **African Journal of Agricultural Research** 9(4):455-64. <http://dx.doi.org/10.5897/AJAR2013.6338>
- Harley, A.D. & Gilkes, R.J. (2000). Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** 56(1):11-36. <https://doi.org/10.1023/A:1009859309453>
- Hinsinger, P. & Jaillard, B. (1993). Root-induced release of interlayer potassium and vermiculitization of phlogopite as related to potassium depletion in the rhizosphere of ryegrass. **Journals in Soil Science** 44(3):525-34. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb00474.x>
- Hinsinger, P.; Bolland, M.D.A. & Gilkes, R.J. (1996). Silicate rock powder: effect on selected chemical properties of a range of soils from Western Australia and on plant growth as assessed in a glasshouse experiment. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** 45(1):69-79. <https://doi.org/10.1007/BF00749883>
- Jimenez Gómez, S. (1992). **Fertilizantes de Liberación Lenta**. Madrid: Mundi-Prensa. 146p.
- Leonardos, O.H.; Theodoro, S.H. & Assad, M.L. (2000). Remineralization for sustainable agriculture: A tropical perspective from a Brazilian viewpoint. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**. 56(1):3-9. <https://doi.org/10.1023/A:1009855409700>
- Luz, A.B.; Lapido-Loureiro, F.E.; Sampaio, J.A.; Castilhos, Z.C. & Bezerra, M.S. (2010). Rochas, minerais e rotas tecnológicas para produção de fertilizantes alternativos. In: Fernandes, F.R.C.; Luz, A.B.; Castilhos, Z.C. In: **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM. p.61-89.
- Malavolta, E.; Vitti, G.C. & Oliveira, S.A. (1997). **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2ª ed. Piracicaba: Potafos. 319 p.
- Manning, D.A.C. (2010). **Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review**. **Agronomy for Sustainable Development** 30(2):281-94. <https://doi.org/10.1051/agro/2009023>
- Martins, E.S.; Oliveira, C.G.; Resende, A.V. & Matos, M.S.F. (2008). Agrominerais – Rochas Silicáticas como Fontes Minerais Alternativas de Potássio para a Agricultura. In: Luz, A.B. & Lins, F. eds. **Rochas e Minerais Industriais – Usos e Especificações**. Rio de Janeiro: CETEM. p.205-21.
- Martins, E.S.; Resende, A.V.; Oliveira, C.G. & Furtini Neto, A.E. (2010). Materiais Silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos. In: Fernandes, F.R.C.; Luz, A.B.; Castilhos, Z.C. eds. **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM. p.89-104.
- Moll, R.H.; Kamprath, E.J. & Jackson, W.A. (1982). Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal** 74(3):562-4. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400030037x>
- Nascimento, M. & Lapido-Loureiro, F.E. (2004). **Fertilizantes e sustentabilidade: o potássio na agricultura brasileira, fontes e rotas alternativas**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. (Série Estudos e Documentos, 61).

- Novais, R.F.; Neves, J.C.L. & Barros, N.F. (1991). Ensaio em ambiente controlado. In: Oliveira, A.J.; Garrido, W.E.; Araújo, J.D. & Lourenço, S. **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília, DF: Embrapa-SEA. p.190-253. (Documentos, 3).
- Prado, R.M. & Vidal, A.A. (2008). Efeitos da omissão de macronutrientes em solução nutritiva sobre o crescimento e a nutrição do milho. **Revista Agropecuária Tropical** 38(3):208-14.
- Raij, B. van; Andrade, J.C.; Cantarella, H. & Quaggio, J.A. (2001). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo. 285p.
- Resende, A.V.; Furtini Neto, A.E.; Martins, E.S.; Hurtado, S.M.C.; Oliveira, C.G. & Sena, M.C. (2012). **Protocolo de avaliação agrônômica de rochas e derivados como fontes de nutrientes às plantas ou condicionadores de solo**. Sete Lagoas-MG: Embrapa Milho e Sorgo. 30p. (Série Documentos, 143).
- Resende, A.V.; Machado, C.T.T.M.; Martins, E.S.; Sena, M.C.; Nascimento, M.T.; Silva, L.C.R. & Linhares, N.W. (2006). Rochas como fontes de potássio e outros nutrientes para culturas anuais. **Revista Espaço e Geografia** 9(1):135-61.
- Ribeiro, L.S.; Santos, A.R.; Souza, L.F.S. & Souza, J.S. (2010). Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes de nutrientes para as plantas solo. **Revista Brasileira de Ciência de Solo** 34(3):891-7. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300030>
- Rosolem, C.A.; Calonego, J.C. & Foloni, J.S.S. (2005). Potassium leaching from millet straw as affected by rainfall and potassium rates. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 36(7-8):1063-74. <http://dx.doi.org/10.1081/CSS-200050497>
- Silva, F.C. (2009). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2ª ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. 627p.
- Torres, J.L.R. & Pereira, M.G. (2008). Dinâmica do potássio nos resíduos vegetais de plantas de cobertura no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência de Solo** 32(4):1609-18. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000400025>
- Van Straaten, P. (2002). Rocks for Crops: Remineralizadors of Sub-Saharan Africa. Nairobi, Kenya: ICRAF.
- Van Straaten, P. (2006). Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. **Anais Academia Brasileira de Ciências** 78(4):731-47. <http://dx.doi.org/10.1590/S0001-37652006000400009>
- Winiwarter, V. & Blum, W.E.H. (2008). From marl to rock powder: on the history of soil fertility management by rock materials. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 171(3):316-24. <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.200625070>