

# Princípios geoquímicos, mineralógicos e biológicos do manejo de remineralizadores de solos

Éder de Souza Martins<sup>1</sup>, Eduardo de Souza Martins<sup>2</sup>, Pablo Rodrigo Hardoim<sup>3</sup>

**Resumo** - Os remineralizadores de solos são insumos derivados de rochas silicáticas ricas em bases que passaram apenas por processos de cominuição, e que atendam aos critérios definidos por legislação do Ministério da Agricultura e Pecuária. Os conceitos da remineralização são derivados de processos naturais de renovação de solo por rochas moídas associados a geleiras, vulcões e planícies fluviais. Estes processos naturais permitem a transformação mineralógica acelerada das rochas naturalmente moídas por ação biológica das plantas, formando solos de elevada qualidade e com propriedades físicas, químicas e biológicas adequadas para o desenvolvimento das plantas selecionadas para a agricultura. Os efeitos diretos dos remineralizadores nos solos são: correção do pH, fornecimento de nutrientes e formação de novas fases minerais com elevada carga superficial. Estes efeitos diretos dependem da composição química, mineralógica e granulométrica dos remineralizadores. Classificam-se cinco tipos de fontes de rochas silicáticas para o desenvolvimento dos remineralizadores de solos: magnésiano (ultramáficas); cálcio-magnésiano-potássico (ultramáficas alcalinas); cálcio-magnésiano (básicas); cálcico (calcissilicáticas); potássico (alcalinas, ricas em biotita e em glauconita). O desenvolvimento da granulometria dos insumos derivados de rochas silicáticas utiliza os conceitos de reatividade dos minerais para a indicação dos efeitos de curto, médio e longo prazos em solos.

**Palavras-chave:** mineralogia; biointemperismo; reatividade; agromineral silicático; insumo regional.

## Geochemical, mineralogical and biological principles of soil remineralization management

**Abstract** - Soil remineralizers are inputs derived from silicate rocks rich in bases that have only undergone comminution processes and that meet the criteria defined by legislation of the Ministério da Agricultura e Pecuária = Ministry of Agriculture and Livestock. Soil remineralization concepts consider natural processes of soil renewal by ground rocks associated with glaciers, volcanoes and river plains. These natural processes allow the accelerated mineralogical transformation by the biological action of plants of rocks naturally ground, forming high quality soils, with physical, chemical and biological properties suitable for the development of the plants that humanity has selected for agriculture. The direct effects of remineralizers on soils are the correction of soil pH, the supply of nutrients and the formation of new mineral phases with high surface charge. These direct effects depend on the chemical, mineralogical and granulometric composition of remineralizers. This work proposes to classify five types of silicate rock sources for the development of remineralizers: magnesian (ultramafic); calcium-magnesian-potassium (alkaline ultramafics); calcium-magnesian (basic); calcium (calc-silicate); potassium (alkaline, rich in biotite, rich in glauconite). The development of granulometry of inputs derived from silicate rocks uses the concepts of mineral reactivity to indicate short, medium and long-term effects on soils.

**Keywords:** mineralogy; bioweathering; reactivity; silicate agromineral; regional input.

### INTRODUÇÃO

Os remineralizadores de solos constituem insumos regulamentados em 2016

(BRASIL, 2016) e já estão sendo adotados em pelo menos 5 milhões de hectares (ANUÁRIO ESTATÍSTICO, 2021). Estes novos insumos prometem ser multifuncio-

nais, melhorando a saúde do solo, disponibilizando nutrientes e sequestrando carbono (C) (MANNING; THEODORO, 2020; SWOBODA; DÖRING; HAMER, 2022).

<sup>1</sup>Geólogo, D.Sc., Pesq. EMBRAPA Cerrados, Planaltina, DF, eder.martins@embrapa.br.

<sup>2</sup>Biólogo, M.Sc., Presidente GAAS, Goiânia, GO, presidente@gaasbrasil.com.br.

<sup>3</sup>Eng. Agrônomo, D.Sc., Diretor Técn. Trópica Serviços Agropecuários Ltda., Belo Horizonte, MG, tropica.ag@gmail.com.

*Submissão: 15.12.2022 - Aprovação: 23.12.2022*

Estudos recentes mostram os efeitos dos remineralizadores como fontes de nutrientes (SORATTO *et al.*, 2021ab; CONCEIÇÃO *et al.*, 2022; CRUSCIOL *et al.*, 2022), na correção do solo (MORETTI *et al.*, 2021; CONCEIÇÃO *et al.*, 2022), no aumento da eficiência de uso do fósforo (P) (SANTOS *et al.*, 2021; BUSATO *et al.*, 2022; CONCEIÇÃO *et al.*, 2022), e na formação de minerais novos e aumento de carga superficial (SANTOS *et al.*, 2021; KRAHL, 2020). A adoção dos remineralizadores apresenta questões novas no que se refere ao manejo da fertilidade de solos tropicais, relacionadas com os processos de transformação mineralógica nos solos e seus efeitos agrônômicos. O modelo de manejo de fertilidade do solo, com base apenas em fontes solúveis em água, falha em explicar como funciona os remineralizadores em solos agrícolas (SWOBODA *et al.*, 2022).

Por outro lado, falta desenvolver estudos que indiquem as formas mais eficientes de manejo dos remineralizadores, especialmente em condições tropicais. Ao mesmo tempo, existe uma grande diversidade de fontes de remineralizadores e

os aspectos de manejo ainda precisam ser desenvolvidos, apesar da demonstração de sua eficiência em diferentes situações experimentais e na prática da agricultura.

Este artigo tem como objetivo apresentar as bases geoquímica, mineralógica e biológica de funcionamento dos remineralizadores em solos agrícolas tropicais.

### PRINCÍPIO GEOQUÍMICO DA REMINERALIZAÇÃO DE SOLOS

Os remineralizadores são definidos como insumos minerais derivados de rochas silicáticas que passaram apenas por processos de cominuição (britagem e moagem), com a finalidade de melhorar as características químicas, físicas e biológicas de solos agrícolas. Esta definição de remineralizadores está na Lei nº 12.890, de 10.12.2013 (BRASIL, 2013), que alterou a Lei nº 6.894 de 16.12.1980, e que definiu os insumos minerais para o manejo da fertilidade do solo e nutrição de plantas (BRASIL, 1980).

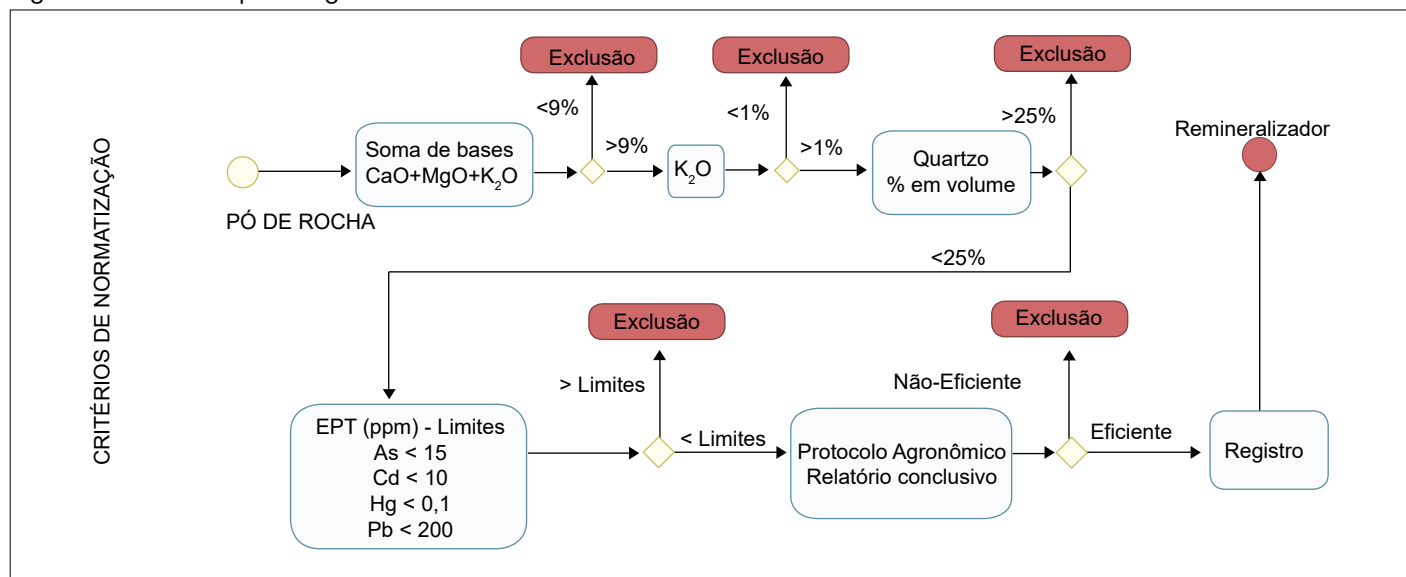
A Lei nº 12.890 foi regulamentada pela Instrução Normativa nº 5, de 10.03.2016 publicada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)

(BRASIL, 2016), que definiu critérios para registro e fiscalização destes insumos, em função de cinco características geoquímicas, mineralógicas e agrônômicas (Fig. 1). O desenvolvimento da regulamentação e da adoção dos remineralizadores deve-se ao protagonismo do Brasil, a partir das edições do Congresso Brasileiro de Rochagem (CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 2010, 2013, 2017, 2021).

A Instrução Normativa nº 5, de 2016, determina que o remineralizador de solos tenha garantias mínimas, definidas em cinco critérios (BRASIL, 2016):

- soma de bases (SB) totais na forma de óxidos ( $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$ ) de no mínimo 9%;
- teor mínimo de  $\text{K}_2\text{O}$  total de 1%;
- conteúdo máximo de 25% de quartzo (sílica livre);
- concentrações máximas de elementos potencialmente tóxicos: arsênio (As), <15 mg/kg; cádmio (Cd), <10 mg/kg; mercúrio (Hg), <0,1 mg/kg; chumbo (Pb), <200 mg/kg;
- teste agrônômico que demonstre a

Figura 1 - Critérios para registro de rochas silicáticas como remineralizadores de solos



Fonte: Elaboração dos autores.

Nota: Figura elaborada de acordo com a Instrução Normativa nº 5, de 10.03.2016, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (BRASIL, 2016).

EPT - Elemento potencialmente tóxico; ppm - Parte por milhão.

eficiência da rocha em modificar as propriedades de fertilidade do solo e o desenvolvimento de plantas.

Além desses critérios mínimos, a Instrução Normativa nº 5, de 2016, determina também a declaração do pH de abrasão do pó de rocha, e que a granulometria esteja definida entre três possíveis classes: farelado, pó ou filler. Atualmente, estão disponíveis 50 produtos registrados no MAPA, todos na granulometria pó ou filler (BRASIL, 2022).

Os remineralizadores são insumos minerais derivados de rochas silicáticas ricas em bases. Os princípios dos critérios da Instrução Normativa nº 5, de 2016 (BRASIL, 2016), estão relacionados com a composição média da crosta terrestre. Observa-se que a composição média da crosta terrestre e a composição média dos solos guardam uma relação direta, em que os principais elementos, oxigênio (O), silício (Si) e alumínio (Al), estão em elevadas proporções; e as bases, em menor nível no solo; enquanto que o C ocorre em níveis elevados no solo, principalmente como C orgânico (Tabela 1). O Gráfico 1 mostra a composição elementar da crosta terrestre, evidenciando as maiores proporções de O, Si e Al. O oxigênio compõe em torno de 50% da crosta terrestre e dos solos. O silício aparece em níveis mais elevados nos solos que na crosta terrestre.

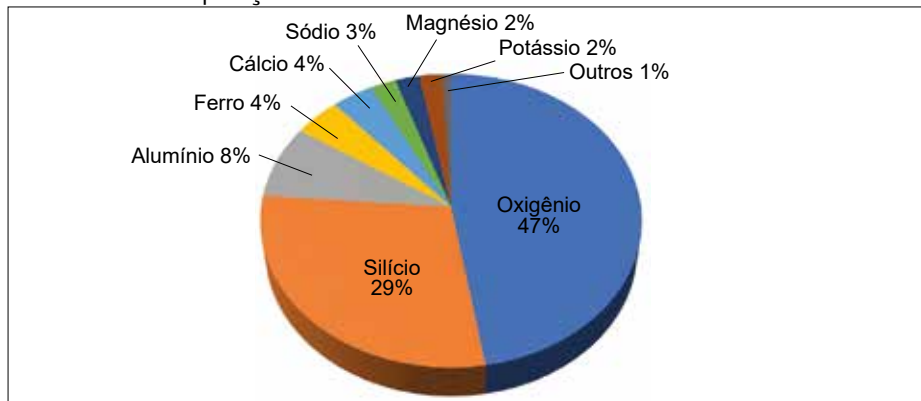
Estas semelhanças gerais da composição média da crosta terrestre e da composição dos solos estão relacionadas diretamente com o processo de formação do solo, onde as rochas constituem seus materiais de origem. O aumento do Si está relacionado com a acumulação de argilo-minerais e de quartzo, que é um mineral de composição  $\text{SiO}_2$ , muito resistente ao intemperismo. Ao mesmo tempo, os elementos móveis, compostos pelas bases cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e sódio (Na), tendem a diminuir nos solos pelos processos de lixiviação. A MO constitui uma das respostas sistêmicas dos solos para aumentar o tempo de residência dos elementos nutrientes em interação com a biota.

Tabela 1 - Composição geoquímica média na forma de óxidos da crosta terrestre e do solo

Óxido (% em massa)	<sup>(A)</sup> Crosta terrestre	<sup>(B)</sup> Média do solo
$\text{SiO}_2$	61,5	70,6
$\text{Al}_2\text{O}_3$	15,1	13,5
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	6,28	5,4
$\text{K}_2\text{O}$	2,4	1,6
$\text{Na}_2\text{O}$	3,2	0,85
CaO	5,5	1,9
MgO	3,7	1,0
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,18	0,18
MnO	0,10	0,11
$\text{TiO}_2$	0,68	0,77
C	0,2	3,8
Total	98,84	99,11

Fonte: (A) Wedepohl (1995) e (B) Winogradow (1954).

Gráfico 1 - Composição média da crosta terrestre



Fonte: Cálculos a partir de Wedepohl (1995).

A SB totais na forma de óxidos ( $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$ ) na crosta terrestre é de 11,6%. A proporção de quartzo na composição mineralógica média da crosta terrestre é de 12% (CLARKE; WASHINGTON, 1924), das rochas sedimentares é de 18,4% e das rochas da crosta continental é de 22,5% (YAROSHEVSKY; BULAKH, 1994). Ou seja, a composição média da crosta terrestre corresponde aos critérios geoquímicos e mineralógicos da Instrução Normativa nº 5, de 2016 (BRASIL, 2016).

Estes fatos estão coerentes com a própria natureza, pois a remineralização tem como conceito fundamental a renovação geoquímica e mineralógica de solos. A escala de tempo de formação de solos é de

$10^3$  a  $10^6$  anos, mas a aplicação de rochas moídas acelera consideravelmente este processo. A cominuição das rochas constitui a etapa da natureza de intemperismo físico por meio de processos industriais. A velocidade de intemperismo dos remineralizadores nos solos pode ocorrer na escala de tempo agrônômica, de  $10^0$  a  $10^1$  anos, uma vez que aumenta a superfície específica e o contato da ação das soluções e da biota sobre os minerais.

Outra questão fundamental está nas limitações das *commodities* fertilizantes, que são derivadas de agrominerais finitos para a escala humana, como são as fontes de fosfatos e de sais de potássio (AL RAWASHDEH, 2020; WALAN *et*

al., 2014). O Gráfico 2 indica os limites de disponibilidade destas fontes ainda no século XXI.

Estas limitações estão relacionadas com a exaustão de depósitos de fontes de sais de potássio e de fosfatos. A humanidade precisa desenvolver estratégias para alongar o uso dessas fontes nobres e desenvolver novos agrominerais, transferindo soluções globalizadas para soluções locais e regionais.

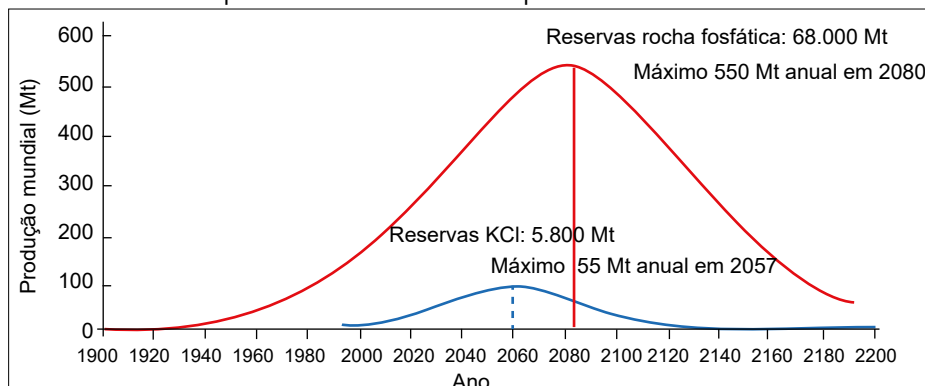
Uma perspectiva geoquímica desta abordagem é justamente verificar que o K na crosta terrestre ocorre fundamentalmente na forma de silicatos, enquanto que, na forma de sais, equivale a apenas 0,01% do total. Realmente é necessário desenvolver estratégias para aproveitar as fontes silicatadas de K que ocorrem próximas às áreas agrícolas. A Figura 2 mostra como o K está distribuído na crosta terrestre do ponto de vista geoquímico e mineralógico.

Os agrominerais constituem as matérias-primas de origem mineral utilizadas na produção de insumos destinados ao manejo da fertilidade do solo agrícola. Propõe-se uma classificação de agrominerais em função do ânion, sempre associados a algum tipo de base (Ca, Mg e K): cloreto, sulfato, carbonato, fosfato, borato e silicato (Tabela 2).

Os agrominerais silicáticos são os mais abundantes e disponíveis regionalmente. A Figura 3 mostra um dos resultados da primeira proposta de Zoneamento Agrogeológico do Brasil na escala de 1:1.000.000 (EMBRAPA; CPRM, 2018), indicando o potencial econômico dos agrominerais silicáticos que estão disponíveis para qualquer área agrícola a menos de 300 km de distância.

O processo de remineralização de solos pode ser observado naturalmente nos processos de formação, transporte e distribuição de rochas moídas naturais, como é o caso dos vulcões, das geleiras e dos sedimentos fluviais. A Figura 4 mostra o conceito da remineralização de solos na natureza e a imitação humana por processos tecnológicos.

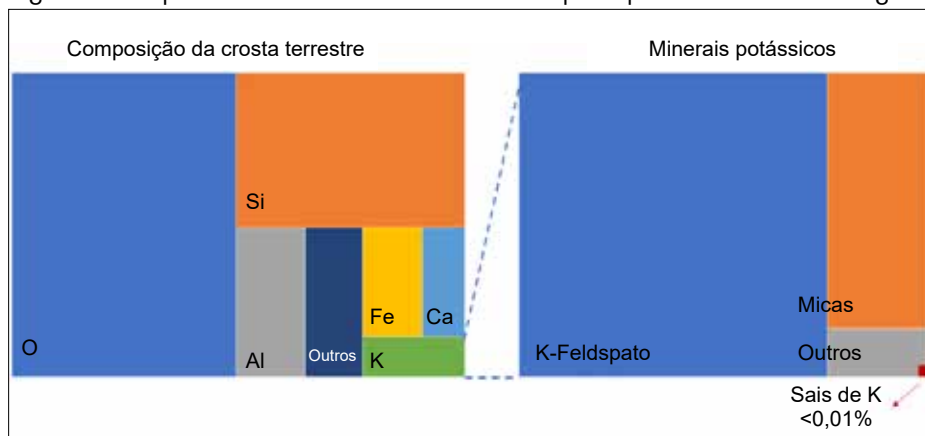
Gráfico 2 - Modelo de disponibilidade com limitações iniciais de fontes de potássio para 2060<sup>(A)</sup> e de fósforo para 2080<sup>(B)</sup>



Fonte: (A) Al Rawashdeh (2020) e (B) Walan *et al.* (2014).

Nota: Mt = megatonelada, corresponde a 1 milhão de toneladas.

Figura 2 - O potássio na crosta terrestre e suas principais formas mineralógicas



Fonte: Elaboração dos autores.

A remineralização de solos reinicia o processo de intemperismo pela aplicação de rochas moídas na superfície do solo, exatamente a camada com maior atividade biológica. O processo de intemperismo químico tende a avançar à frente do intemperismo em profundidade. A aplicação de minerais frescos na superfície inverte este processo e renova os solos por meio do processo de intemperismo aprimorado, com contribuição de novas superfícies, liberação de nutrientes e correção do solo. Esta pode ser uma das estratégias para desenvolver manejos das zonas críticas em ambientes tropicais. A Figura 5 mostra o conceito da zona crítica e como a remineralização pode contribuir para mudar o comportamento e equilibrar os processos hidrogeoquímicos e biológicos da paisagem.

Recentemente, vários autores têm indicado que estas rochas moídas naturais podem ser utilizadas no manejo da fertilidade do solo, como é o caso das cinzas vulcânicas (MINASNY *et al.*, 2021) e dos sedimentos glaciais finos (GUNNARSEN *et al.*, 2019).

Estudo recente de Crusciol *et al.* (2022) demonstra que a aplicação a lanço e em área total de agrominerais silicáticos potássicos, formados principalmente por feldspato potássio, da mesma forma que acontece em ambientes vulcânicos, apresenta elevada eficiência agrônômica relativa ao cloreto de potássio (KCl). Ou seja, imitar a natureza é a melhor estratégia em relação aos processos de renovação dos solos agrícolas.

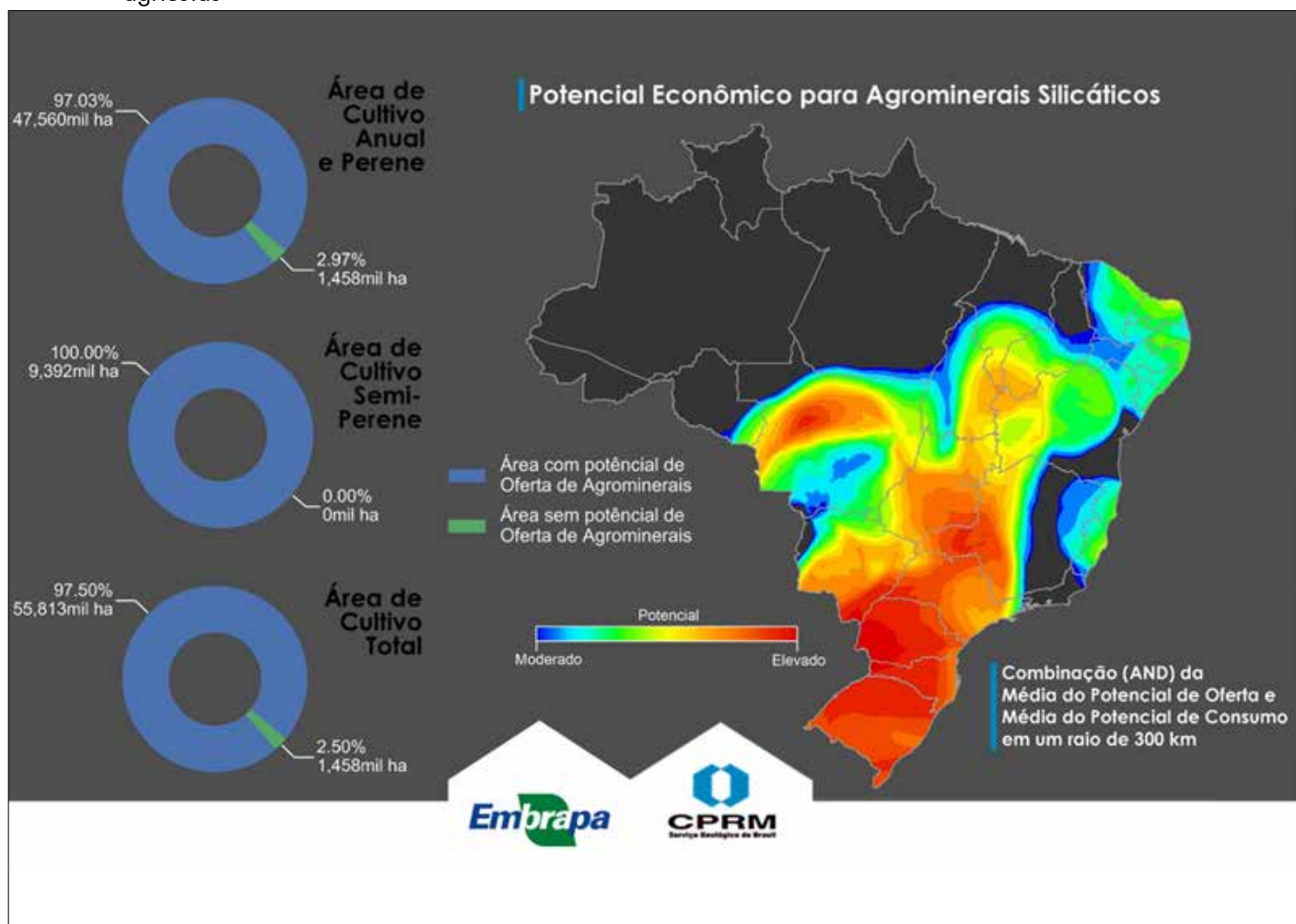
Tabela 2 - Tipos de agrominerais disponíveis, solubilidade em água e disponibilidade relativa

Classe de ânion	Tipo de rocha	Cátion principal	<sup>(A)</sup> Cobertura da crosta terrestre (% área)	Solubilidade em água
Cloreto (Cl <sup>-1</sup> )	Depósitos evaporíticos (sedimentar)	K <sup>+</sup>	0,0	Muito alta
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	<sup>(B)</sup> Depósitos evaporíticos (sedimentar)	Ca <sup>2+</sup> (Mg <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> )	0,0	Muito alta
Carbonato (CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> )	<sup>(C)</sup> Calcário (sedimentar), <sup>(D)</sup> carbonatito (ígneo) e <sup>(E)</sup> mármore (metamórfico)	Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup>	15	Baixa
Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> )	<sup>(F)</sup> Fosforito (sedimentar) e <sup>(G)</sup> foscorito (ígneo)	Ca <sup>2+</sup>	0,0	Baixa
Borato (BO <sub>3</sub> <sup>-3</sup> )	<sup>(H)</sup> Borato (sedimentar)	Ca <sup>2+</sup>	0,0	Baixa-Alta
Silicato (SiO <sub>4</sub> <sup>-4</sup> )	<sup>(I)</sup> Sedimentar, <sup>(J)</sup> ígneo e <sup>(K)</sup> metamórfico	Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup>	85	Muito baixa

Fonte: (A) Goldscheider *et al.* (2020), (B) Raymundo *et al.* (2013), (C) Sousa *et al.* (1989), (D) Andrade, Martins e Mendes (2002), (E) Rocha *et al.* (2014), (F) Lopes *et al.* (2022), (G) Resende *et al.* (2006), (H) Dameto, Moraes e Moreira (2023), (I) Arrieta *et al.* (2020), (J) Conceição *et al.* (2022) e (K) Krahl *et al.* (2022).

Nota: A Fonte refere-se a exemplos de pesquisa com agrominerais in natura.

Figura 3 - Potencial de ocorrência de agrominerais silicáticos no Brasil a menos de 300 km de distância de todas as áreas agrícolas



Fonte: Embrapa e CPRM (2018).

Figura 4 - Remineralização na natureza e imitação humana

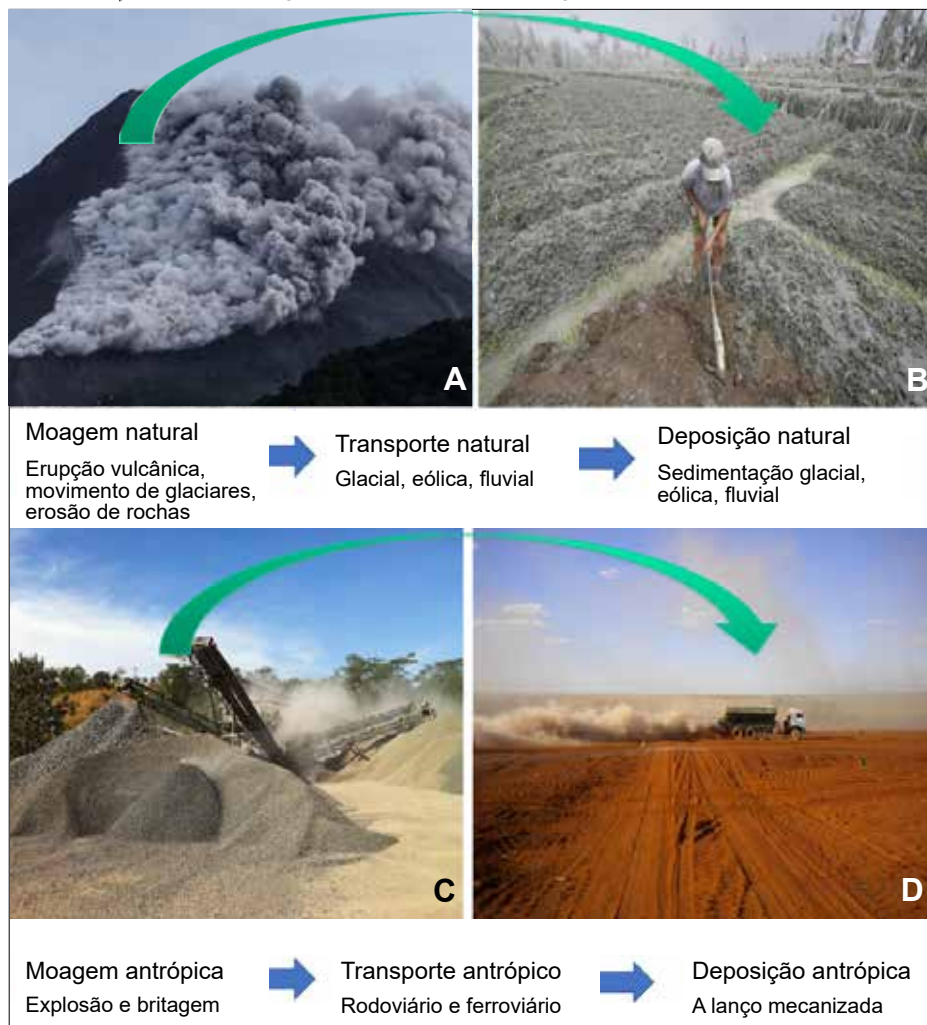
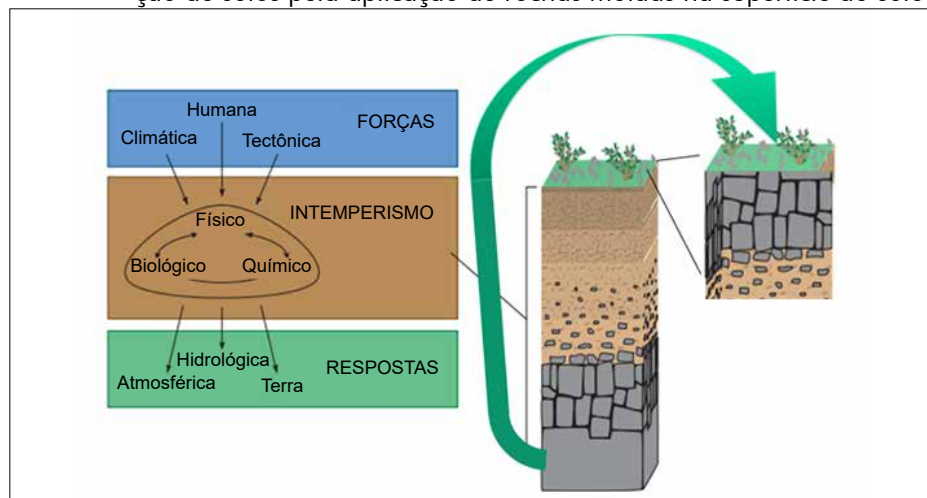


Foto: A - Hendra Nurdyansyah (via Reuters), Foto: B - Sri Lestari (BBC), Fotos C e D - Eder de Souza Martins

Nota: A - Conceito de remineralização natural do solo com a produção da rocha moída; B - Deposição no solo agrícola; C - Imitação humana por processos tecnológicos com a produção da rocha moída na mineração; D - Aplicação no solo agrícola.

Figura 5 - Conceito de zona crítica e como a remineralização acelera a formação de solos pela aplicação de rochas moídas na superfície do solo

Fonte: Adaptado de Brantley *et al.* (2005).

## REQUISITOS DA REMINERALIZAÇÃO DE SOLOS

A agricultura da Revolução Verde, com base no uso massivo de insumos químicos, fertilizantes altamente solúveis e pesticidas, interfere na funcionalidade da microbiologia do solo, empobrecendo as interações e comprometendo os serviços de nutrição, estímulo de crescimento e proteção desempenhada pela microbiota. O excesso de sais e as moléculas químicas utilizadas funcionam como fatores negativos para a saúde do solo.

O resultado é a redução da MO do solo e da oxigenação, o comprometimento físico e a disfuncionalidade biológica, criando condições para o solo transformar-se em “condutor” de doenças e pragas, e ainda mais dependente de insumos convencionais.

O manejo da fertilidade de solo para a produção agrícola baseia-se em princípios e conceitos de que as plantas alimentam-se absorvendo os nutrientes na forma de íons solúveis em água, base da Revolução Verde, com grande evolução no século XX. Esta abordagem desconsidera as habilidades das plantas, fundamentais para a sua existência:

- as plantas desenvolveram um processo complexo de interações com microrganismos nas últimas centenas de milhões de anos, para estabelecer um sistema do qual cada simbiote beneficia-se com a associação para prosperar (BRUNDRETT, 2002; KRINGS *et al.*, 2007). As plantas fornecem exsudados das raízes para alimentar os microrganismos do solo, em troca, os simbiotes microbianos fornecem às plantas nutrientes que não são facilmente solúveis no solo e outros serviços (LAMBERS *et al.*, 2009);
- o aumento da deposição de fertilizantes solúveis pode alterar as atividades microbianas em relação à ciclagem de nutrientes, afetando o equilíbrio entre as taxas de mineralização e imobilização (GAO *et*

al., 2016). Existe uma forte relação entre a biodiversidade microbiana e o funcionamento e serviços ecológicos do solo (BALVANERA *et al.*, 2006). Essa perda de diversidade biológica compromete a capacidade do ecossistema de fornecer à sociedade os bens e serviços fundamentais (CARDINALE *et al.*, 2012).

Portanto, usando nutrientes em quantidades maiores do que a necessária para o crescimento e desenvolvimento adequado das plantas, bem como, aplicando biocidas indiscriminadamente, os agricultores promovem mais danos do que benefícios à produção agrícola e, por contaminação, aos ambientes ao redor. Como consequência direta deste Sistema Agrícola, uma parcela crescente dos recursos não renováveis do planeta está sendo consumida, o que pode potencialmente minar a capacidade dos ecossistemas de sustentar a produção de alimentos (FOLEY *et al.*, 2005).

Do ponto de vista da agricultura sustentável adotada neste artigo, o relevante é o quanto dos processos ecológicos naturais pode ser aplicado ao manejo agrícola, diminuindo os efeitos negativos e a dependência dos insumos importados e melhorando a saúde do Sistema, a manutenção da produtividade e a renda do produtor. O foco sempre estará no Sistema de Produção, em como os processos podem ser melhorados, atuando mais nas causas dos problemas e menos nos sintomas. A abordagem não implica em negar o funcionamento dos insumos convencionais, e muito menos renunciar ao uso destes, mas complementar suas funcionalidades, aumentar a eficiência e minimizar os efeitos negativos.

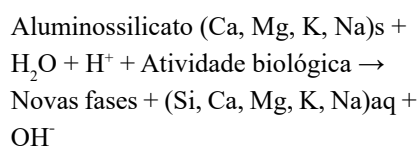
Para o senso comum, pode parecer estranho o uso de remineralizadores como insumo para o manejo da fertilidade, mas se for entendido o papel dos minerais no funcionamento da vida, constata-se que estes são onipresentes em toda a evolução, na formação e nas dinâmicas do solo, como fonte de elementos químicos essenciais para a cadeia trófica, de minerais que realizam os processos de tamponamento

físico-químico-biológico do Sistema e dos biomas que suportam, além de constituírem os ambientes das interações entre plantas e microrganismos.

Os elementos dos minerais, tratados como fontes de nutrientes e de superfície ativa, participam de todos os processos bioquímicos da planta, desde as raízes, no transporte de seiva, na fotossíntese, no crescimento vegetativo e na fase reprodutiva.

Uma vez que a remineralização reproduz o processo de formação de solos, ocorrem essencialmente três efeitos diretos dos remineralizadores (Fig. 6): fornecimento de nutrientes, correção do solo e formação de novas fases minerais.

A Equação do processo de remineralização, que é a mesma do processo de intemperismo de minerais silicáticos, indica os efeitos diretos nos solos:



Em que os aluminossilicatos ricos em bases presentes no remineralizadores reagem com a água em condições de solo ácido e a atividade biológica do Sistema Agrícola, formando novas fases minerais com elevada carga superficial, liberando

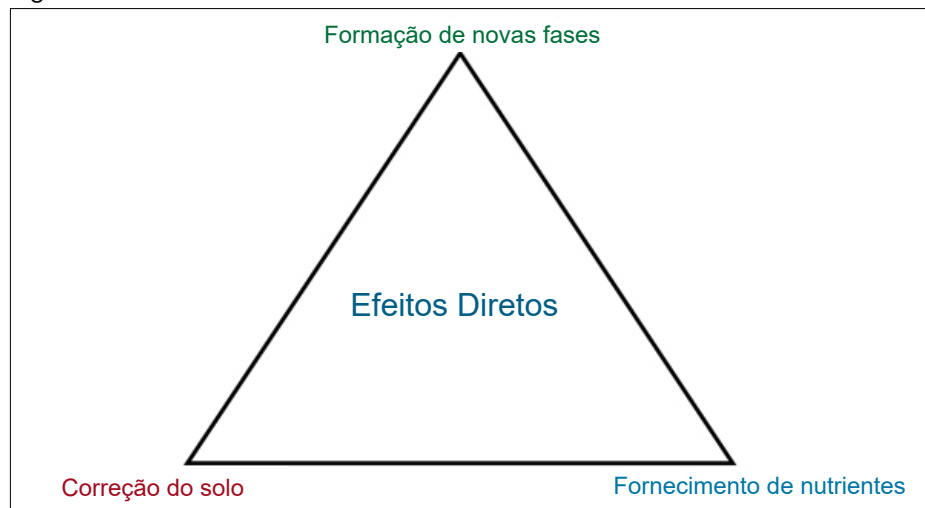
nutrientes e aumentando o pH do meio. Uma das questões essenciais desse tipo de processo é que as novas fases minerais geradas são mais estáveis e podem permanecer no solo em longo prazo, modificando as características físico-químicas deste.

Assim, as rochas que são utilizadas como matérias-primas, ou simplesmente agrominerais silicáticos, para a produção dos remineralizadores, devem ser ricas em bases. Propõe-se a classificação dos tipos de agrominerais silicáticos em cinco classes de composição: magnesiano (dunitos, serpentinitos); cálcico (rochas calcissilicáticas, anortositos); potássico (rochas alcalinas, rochas ricas em filossilicatos potássicos); cálcio-magnesiano (rochas básicas); cálcio-magnésio-potássico (rochas ultramáficas alcalinas).

As rochas mais ricas em Ca e/ou Mg apresentam maior potencial de correção. As rochas ultramáficas, representadas especialmente por dunitos e serpentinitos, são os agrominerais silicáticos magnesianos mais comuns, considerados excelentes corretivos, com poder de neutralização geralmente maior que 70%, e fornecimento principalmente de Si, Mg e níquel (Ni). A granulometria ideal deve ser no mínimo pó, ou mais fino, conforme classificação do MAPA.

As rochas ultramáficas alcalinas, especialmente os kamafugitos, na forma de

Figura 6 - Efeitos diretos dos remineralizadores nos solos



Fonte: Elaboração dos autores.

agrominerais silicáticos cálcio-magnésio-potássico, são também excelentes corretivos, a depender da soma de óxidos de bases, que pode variar de 25% a 70% o poder de neutralização. Este tipo de fonte é a que apresenta o maior conteúdo de nutrientes em proporções equilibradas, especialmente de Si, Ca, Mg, K, fósforo (P), cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn) e ferro (Fe).

As rochas ricas em Ca, como representantes dos agrominerais silicáticos cálcicos, especialmente as rochas metamórficas calcissilicáticas, sedimentares com intercalações de níveis carbonáticos silicatos, e ígneas do tipo anortositos, são também excelentes corretivos de solo, com geralmente 50% de poder de neutralização. Estas são fontes de Ca, Si, Mn e Zn. A granulometria ideal deve ser mais fina, pó mais fino ou filler.

As rochas básicas, ricas em Ca e Mg, representantes dos agrominerais silicáticos cálcio-magnesianos, também contribuem para a correção do solo, com poder de neutralização em torno de 30%. Constituem fontes equilibradas e são abundantes em praticamente todas as regiões do Brasil, principalmente basaltos, diabásios, gabros, anfibolitos e granulitos básicos. Fornecem principalmente Ca, Mg, Si, Cu, Zn, Mn e Zn.

As rochas potássicas apresentam uma grande diversidade como agrominerais silicáticos potássicos, especialmente as ricas em micas do tipo biotita e flogopita, argilomineral do tipo glauconita, e minerais do tipo feldspato potássico e feldspatoides. Estas rochas não constituem bons corretivos de solo, mas são fornecedoras de K, além de Mn e Zn. A depender da composição mineralógica, deve apresentar granulometria filler, como é o caso dos minerais biotita, flogopita, glauconita e feldspatoides, para ser eficiente. No caso do feldspato potássico, é necessário que a granulometria seja mais fina que 200 mesh.

Conforme pode ser constatado pelos tipos de agrominerais silicáticos, os fatores do insumo devem ser considerados na busca do que é necessário para o

manejo eficiente dos remineralizadores. Os principais fatores correspondem à composição química, mineralógica e granulométrica (Fig. 7). Podem-se, por exemplo, combinar diferentes fontes, como os derivados de agrominerais silicáticos potássicos com fontes ricas em Ca e Mg, para equilibrar os nutrientes e os benefícios, a depender da disponibilidade regional.

Por outro lado, a eficiência do processo de remineralização depende dos processos biológicos. De forma distinta das fontes solúveis em água, a cinética de transformação dos minerais e o desenvolvimento dos efeitos diretos dependem da ação biológica do Sistema Agrícola, especialmente a ação da rizosfera das plantas.

Dessa forma, a adoção dos remineralizadores funciona em conjunto com outras práticas, destacando-se:

- aumento da oferta de C no solo, buscando a manutenção do solo coberto;
- redução do uso de insumos ofensivos à biologia do solo, estimulando o funcionamento da cadeia trófica;
- rotação de culturas, uso do mix de cobertura e integração de sistemas, buscando o aumento da exploração radicular no perfil do solo e a diver-

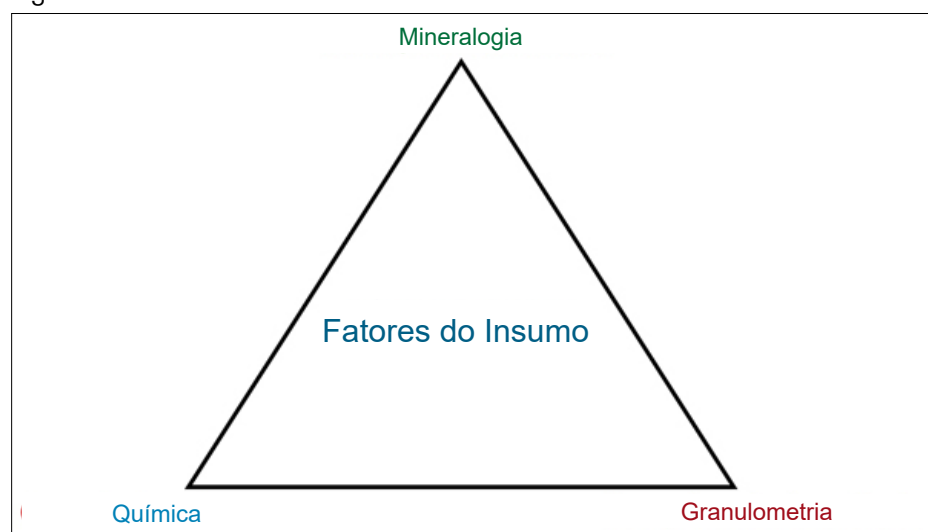
sificação de qualidade de exsudatos de raízes.

Nessas condições, além de nutrientes, os remineralizadores ativam a biologia do solo estabelecendo um ciclo virtuoso na interação entre plantas-microrganismos-minerais. Sabe-se que diferentes minerais selecionam diferentes microrganismos do solo, o que permite especular que a ativação biológica gerada e as boas respostas das culturas podem ter relação com os ambientes minerais do centro de origem das plantas domesticadas, em geral, ricos em nutrientes e minerais silicáticos pouco alterados.

O uso dos remineralizadores tem alcance regional, ditado pelo raio econômico da logística, considerando os volumes requeridos para as culturas e as características das rochas disponíveis. A geologia regional, os solos e as culturas requerem recomendações próprias para o uso dos remineralizadores, visando o longo prazo e permitindo uma melhoria estrutural do solo, substituindo e complementando as práticas convencionais de manejo da fertilidade.

A adoção dos remineralizadores, em geral, diminui os custos de produção, pela redução da dependência e uso racional dos fertilizantes convencionais.

Figura 7- Fatores do insumo dos remineralizadores de solos



Fonte: Elaboração dos autores.



## FUNDAMENTOS BIOLÓGICOS DA REMINERALIZAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS

Os solos tropicais profundamente intemperizados apresentam características perfeitas para a remineralização: baixa capacidade de troca de cátions (CTC), baixa retenção de água e limitada reserva de nutrientes nos minerais que, somadas às condições de umidade, temperatura e potencial de atividade biológica, criam fatores favoráveis para o intemperismo na escala de tempo agrônômica dos minerais dos remineralizadores aplicados (EDWARDS *et al.*, 2017).

Em termos globais, as condições favoráveis para a remineralização alcançam os trópicos úmidos e as savanas ácidas, que totalizam 1,51 milhão de hectares (GRACE *et al.*, 2006) e onde estão concentradas as atividades de agricultura na América do Sul, África e Austrália (FAGERIA; BALIGAR, 2008).

O crescimento dos custos do manejo da fertilidade convencional e o interesse dos agricultores pelas bases regenerativas de produção agrícola têm aumentado o uso de remineralizadores no Brasil, principalmente na produção de grãos, integrado num manejo que inclui o plantio direto, a aplicação de biológicos produzidos na fazenda e a adoção de mix de culturas de cobertura. A área com a adoção dessas práticas já alcança 5 milhões de hectares (ANUÁRIO ESTATÍSTICO, 2021).

O uso crescente dos remineralizadores e as evidências empíricas dos benefícios ao Sistema Agrícola foram estímulos para buscar mecanismos de ação dos minerais silicáticos em solos tropicais. As pesquisas e revisões sobre o tema orientam-se principalmente na disponibilização de nutrientes na perspectiva tradicional de fertilidade, faltando abordagens integradas que incluam a interação plantas - microrganismos - minerais para explicar os benefícios dos agrominerais silicáticos nos solos agrícolas, principalmente em ambientes tropicais.

O intemperismo melhorado em solos tropicais fundamenta-se em apontar rochas silicáticas cominuídas com minerais pouco

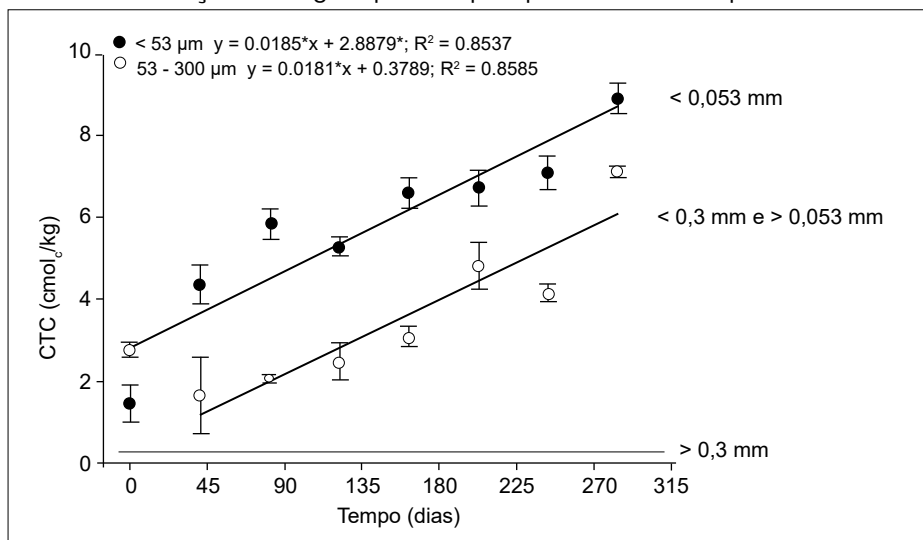
alterados, e que sob a ação biológica do solo sejam capazes de restaurar a matriz organomineral, aumentando suas funcionalidades para o desenvolvimento das culturas. O intemperismo melhorado de solos tropicais oferece um ambiente que permite às culturas recorrer aos próprios mecanismos evolutivos para acessar nutrientes e outras funções essenciais na interação raízes - microrganismos - minerais.

O processo de biointemperismo é o principal mecanismo de transformação mineral na escala de tempo agrônômica, onde podem ser caracterizados os efeitos diretos descritos anteriormente. Vários autores mostram que determinados minerais, como é o caso da biotita, dependem do biointemperismo para a transformação mineralógica. Krahl *et al.* (2022) mostram que a ação da rizosfera transforma biotita em hidrobiotita, um intermediário da vermiculita, contribuindo para a geração de CTC de origem mineral, que é estável no longo prazo. O Gráfico 3 ilustra a taxa de formação de CTC pelo intemperismo da biotita por ação da rizosfera do milho, saindo de 3 cmol<sub>c</sub>/kg para 9 cmol<sub>c</sub>/kg, em 10 meses de ação biológica de raízes de milho para a fração menor que 0,053 mm, que promove a liberação de K e a formação de hidrobiotita e vermiculita. Outra

conclusão muito importante deste processo é a limitação da granulometria. As frações menores que 0,053 mm e entre 0,053 e 0,3 mm geram CTC, enquanto que a fração maior que 0,3 mm não gera. Dessa forma, pode-se indicar que a granulometria mínima eficiente deve ser menor que 0,3 mm, necessária para fontes ricas em biotita. Este trabalho também mostra que o contato da rocha moída apenas com água durante o experimento, sem a ação biológica das raízes, não promoveu nenhuma mudança mineralógica detectável pelas técnicas avaliadas. Ou seja, o biointemperismo é essencial para a eficiência do processo de remineralização de solos. A aplicação de remineralizadores em solos compactados e biologicamente pobres inviabiliza seus efeitos na escala de tempo agrônômica.

Por outro lado, Santos *et al.* (2021) mostram que a aplicação de biotita sienito em Latossolo cultivado com milho foi capaz de alterar a proporção de cargas variáveis e permanentes, aumentando esta última de 21% para 47%, para as doses zero e 2.400 kg/ha, respectivamente, e as cargas totais de 2,6 cmol<sub>c</sub>/kg para 3,2 cmol<sub>c</sub>/kg. Estas mudanças são significativas para doses agrônômicas deste tipo de insumo e considerando que foi apenas um ciclo do milho de 100 dias.

Gráfico 3 - Geração de carga superficial pelo processo de intemperismo da biotita



Fonte: Krahl *et al.* (2022).

Nota: CTC - Capacidade de troca de cátions.

Na maioria dos remineralizadores são gerados minerais de baixa cristalinidade, com elevada superfície específica e carga superficial (FINLAY *et al.*, 2020; SILVA; FERREIRA; AZEVEDO, 2021). Estas superfícies de interação ativam a reestruturação das comunidades microbianas do solo e o estímulo à oferta dos exsudatos das raízes. Outras fontes de C orgânico oferecem energia para a ativação biológica, colaborando para o biointemperismo dos minerais, aumentando a disponibilização de nutrientes e a formação de minerais secundários, em geral, ricos em superfície ativa, e contribuindo para a formação de microagregados.

Uma vez que são formados novos minerais de alta cristalinidade, como é o caso da transformação da biotita em hidrobiotita e vermiculita, e de baixa cristalinidade a partir de outros minerais silicáticos, nutrientes são liberados no processo de intemperismo dos remineralizadores. Estudos mostram que agrominerais silicáticos são fontes de K (NOGUEIRA *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2021; SORATTO *et al.*, 2021ab).

O aumento da diversidade mineral também contribui para a diversificação do microbioma, amplia a oferta de microrganismos funcionais do solo a serem recrutados para as rizosferas das culturas e cria um processo que se retroalimenta com o intemperismo gradual dos minerais silicáticos.

Uma hipótese que precisa ser testada é que o uso de remineralizadores resgata as habilidades da maioria das culturas na interação com os minerais semelhantes aos ambientes de seus centros de origem. Se isto for confirmado, será possível desenvolver ambientes agrícolas customizados para os sistemas produtivos em relação aos aspectos de funcionamento biogeoquímico.

### ESTRATÉGIAS PRELIMINARES DE MANEJO DE REMINERALIZADORES EM FUNÇÃO DA MINERALOGIA

Os agrominerais silicáticos apresentam composição química e mineralógica complexas, sendo necessária uma caracteriza-

ção com técnicas adequadas para iniciar a compreensão de seu comportamento agrônomo e de modificação das propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos manejados com os remineralizadores.

A princípio, é fundamental uma caracterização geoquímica e mineralógica quantitativa. Os elementos químicos determinados devem ser os teores totais, sendo que os elementos maiores devem ser apresentados na forma de óxidos e os elementos traços em mg/kg. Os métodos de extração parcial não são adequados nesta fase de caracterização dessas fontes, portanto, vários estudos estão sendo desenvolvidos para avaliar extratores e outras abordagens para a caracterização complementar desses insumos.

O conceito de reatividade deve ser considerado inicialmente para indicar os diferentes tipos de remineralizadores. A reatividade dos minerais pode ser indicada de forma relativa e em função do comportamento agrônomo indicado na literatura.

A Tabela 3 mostra a reatividade dos minerais formadores de rochas ígneas. Neste caso, o potencial de reatividade relativa é maior nos minerais silicáticos ricos em Ca e/ou Mg.

Estudos com fontes derivadas de agrominerais silicáticos magnesianos e agro-

minerais silicáticos cálcio-magnesianos demonstram os efeitos de reatividade dos silicatos ricos em Ca e Mg apenas por incubação com a ação da água em solos ácidos, modificando as características físico-químicas dos solos sem a necessidade de atuação ativa da rizosfera das plantas (MORETTI *et al.*, 2021; CONCEIÇÃO *et al.*, 2022). A ação da rizosfera acelera o processo de extração biológica dos nutrientes para o tecido vegetal.

Por outro lado, foi demonstrado por Krahl *et al.* (2022) que o processo de biointemperismo da biotita é necessário para a transformação mineralógica e a disponibilização de K na escala de tempo agrônoma.

Dessa forma, os minerais ricos em Ca e Mg do tipo anortita, piroxênio, olivina e anfíbolio apresentam elevado potencial de reatividade em solos ácidos, enquanto que a biotita e os outros minerais dependem da ação biológica para obter a eficiência agrônoma.

Estudos recentes demonstraram elevada eficiência de agrominerais silicáticos potássicos derivados de rochas alcalinas como fontes de K, onde o feldspato potássico é o mineral principal e fonte deste nutriente (CRUSCIOL *et al.*, 2022; SORATTO *et al.*, 2021ab). Neste caso,

Tabela 3 - Minerais formadores de rochas ígneas e seu potencial de reatividade em ordem decrescente em função da taxa de dissolução relativa ao feldspato potássico (ortoclásio)

Mineral	Composição química	Classe mineral	$-\Delta G_{sol}$ (kJ/mol)	Taxa de dissolução relativa
Anortita	$CaAl_2Si_2O_8$	Tectossilicato	<sup>(A)</sup> 478	3.630.000 (4.10 <sup>6</sup> )
Piroxênio	$CaMgAlSiO_3$	Inossilicato	<sup>(A)</sup> 537	5.010 (5.10 <sup>3</sup> )
Olivina	$Mg_2SiO_4$	Nesossilicato	<sup>(A)</sup> 977	1.620 (2.10 <sup>3</sup> )
Anfíbolio	$Ca_2Mg_4Al(Al_8Si_4O_{22})(OH)_2$	Inossilicato	<sup>(A)</sup> 495	1.150 (1.10 <sup>3</sup> )
Biotita	$KMg_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	Filossilicato	<sup>(B)</sup> 368,7	1,66 (2.10 <sup>0</sup> )
Ortoclásio	$KAlSi_3O_8$	Tectossilicato	<sup>(A)</sup> 13,7	1 (1.10 <sup>0</sup> )
Albita	$NaAlSi_3O_8$	Tectossilicato	<sup>(A)</sup> 65,6	0,794 (8.10 <sup>-1</sup> )
Muscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	Filossilicato	<sup>(A)</sup> 178	0,016 (2.10 <sup>-2</sup> )
Quartzo	$SiO_2$	Tectossilicato	<sup>(A)</sup> -261	0,005 (5.10 <sup>-3</sup> )

Fonte: Manning e Theodoro (2020). (A) Wieland, Wehrli e Stumm (1988) e (B) Tardy e Du-play (1992).

essas fontes foram cominuídas a uma granulometria mais fina de 200 mesh, ou <0,075 mm. Diferente das fontes ricas em biotita, que são eficientes na granulometria a partir de 50 mesh, ou <0,300 mm. Esta granulometria, <0,300 mesh, é a indicação também para todas as fontes ricas em Ca e Mg.

Deve-se observar, ademais, que os minerais albita, muscovita e quartzo são muito resistentes ao intemperismo e não são considerados, a priori, boas fontes de nutrientes e de minerais novos, pelo menos em médio prazo.

No caso dos minerais silicáticos potássicos, excetuando a muscovita, todos apresentam elevado potencial para disponibilizar K. A Tabela 4 mostra o potencial de dissolução de minerais silicáticos potássicos em relação ao feldspato potássico. A variação das taxas de dissolução relativa dos minerais com potencial para disponibilizar potássio vai de  $10^0$  a  $10^7$ .

Dessa forma, o conceito de reatividade relativa pode ser aplicado para avaliar o potencial dos remineralizadores, e como estes podem ser combinados entre si e com outros insumos minerais. A Figura 8 mostra quatro classes de reatividade de minerais silicáticos:

- alta reatividade química e biológica: minerais que alteram características físico-químicas dos solos apenas com a incubação;
- alta reatividade biológica: minerais que dependem da atividade biológica para serem eficientes na escala de tempo agrônômica desde o primeiro ciclo de cultura;
- baixa reatividade biológica: minerais que dependem da atividade biológica para serem eficientes e que os efeitos agrônômicos mais evidentes ocorrem a partir do segundo ciclo de cultura;
- muito baixa reatividade biológica: minerais muito resistentes ao intemperismo, mas que podem apresentar efeitos indiretos em relação à regulação de N.

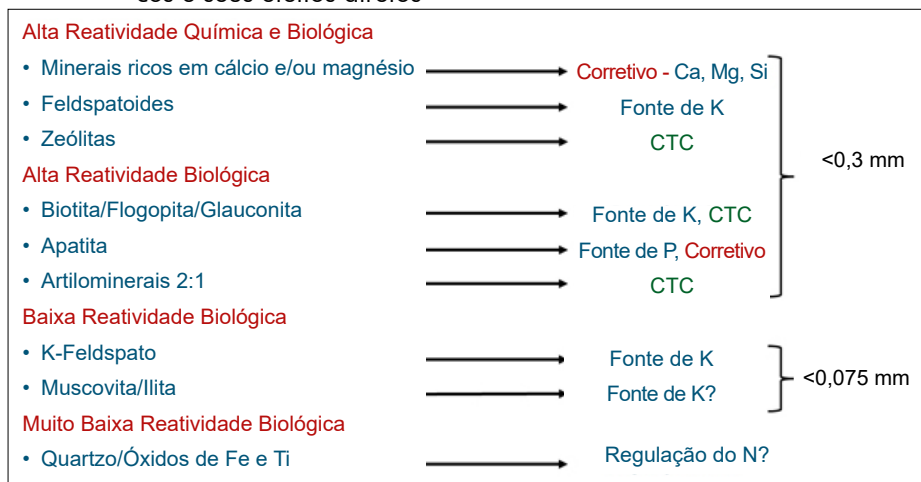
Tabela 4 - Minerais silicáticos potássicos e seu potencial de reatividade em ordem decrescente em função da taxa de dissolução relativa ao feldspato potássico

Mineral	Fórmula química	K (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Taxa de dissolução relativa (K-feldspato)
Kalsilita	KAlSiO <sub>4</sub>	24,68	29,75	<sup>(A)</sup> >nefelina (10 <sup>7</sup> )
Nefelina	(Na,K)AlSiO <sub>4</sub>	13,00	15,67	21.400.000 (10 <sup>7</sup> )
Glauconita	K(Fe,Al,Mg) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	5,49	7,00	182.000 (10 <sup>5</sup> )
Leucita	KAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	17,89	21,56	11.500 (10 <sup>4</sup> )
Flogopita	KMg <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	9,38	11,30	<sup>(B)</sup> 5,81 (6.10 <sup>0</sup> )
Biotita	K(Mg,Fe) <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	9,02	11,00	1,66 (2.10 <sup>0</sup> )
K-feldspato	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	14,03	16,91	1 (10 <sup>0</sup> )
Muscovita	KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	9,03	10,88	0,016 (2.10 <sup>-1</sup> )

Fonte: Manning e Theodoro (2020). (A) Li *et al.* (2015) e (B) Cálculo a partir de Kalinowski e Schweda (1996).

Nota: Observa-se que apenas a muscovita apresenta um potencial muito baixo para disponibilizar K.

Figura 8 - Proposta de classificação de níveis de reatividade de minerais silicáticos e seus efeitos diretos



Fonte: Elaboração dos autores.

Nota: CTC - Capacidade de troca de cátions.

A granulometria indicada para estes insumos deve ser <0,3 mm para as classes alta reatividade química e biológica e alta reatividade biológica, e <0,075 mm para os minerais de baixa reatividade biológica. Os minerais de muito baixa reatividade biológica são considerados inertes na escala de tempo agrônômica.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os remineralizadores de solos constituem insumos regionais derivados de rochas silicáticas ricas em bases (agrominerais silicáticos) e que passaram apenas por processos de diminuição do tamanho de partículas. Os efeitos diretos dos remineralizadores são: fornecimento de nutrientes, aumento do pH do solo e formação de no-

vas fases minerais com elevada superfície específica e carga superficial.

Foi apresentada a classificação dos agrominerais silicáticos em cinco grupos, os ricos em Mg (agrominerais silicáticos magnesianos), em Ca (agrominerais silicáticos cálcicos), em K (agrominerais silicáticos potássicos), em Ca e Mg (agrominerais silicáticos cálcio-magnesianos),

e em Ca, Mg e K (agrominerais silicáticos cálcio-magnesiano-potássicos). O comportamento de cada remineralizador dependerá de sua composição química, mineralógica e granulométrica, sendo os mais reativos aqueles ricos em Ca e Mg, cuja granulometria indicada é de pelo menos 80% menor que 0,3 mm. Os menos reativos são compostos por feldspato potássicos e precisam de uma granulometria muito fina para serem eficientes, mais fina que 0,075 mm.

Os remineralizadores melhoram a eficiência de uso de nutrientes e a qualidade do solo agrícola, diminuindo os custos de produção e a dependência externa de fontes sintéticas solúveis. Apesar de não haver recomendações agrônômicas definidas para diferentes condições produtivas, é possível orientar o uso dos remineralizadores em função de suas características geoquímicas, mineralógicas e granulométricas.

A maior complexidade destas fontes está associada às condições biológicas do solo e das práticas de manejo. Ou seja, os remineralizadores serão eficientes onde são adotadas Boas Práticas Agrícolas (BPA). Por outro lado, os remineralizadores geralmente apresentam efeitos reduzidos ou nulos em solos compactados e/ou com baixa atividade biológica.

A pesquisa sistemática está desenvolvendo estudos de manejo regionalizado dos remineralizadores, com contribuições cada vez mais intensas das instituições de pesquisa em todo o território nacional. Os agricultores são as fontes mais fidedignas para orientar estes esforços de pesquisa, que materializam casos de manejo com diferentes resultados agrônômicos e de modificações de solos.

Dentro destes esforços de pesquisa são fundamentais os efeitos indiretos dos remineralizadores, especialmente a resiliência dos sistemas produtivos, a estabilização da MO e o incremento da qualidade do solo e dos produtos agrícolas. Os primeiros resultados indicam que a remineralização de solos incrementa a qualidade dos produtos agrícolas, percebidos, por exemplo, pelo

aumento da densidade nutricional e pelo tempo de prateleira.

Os remineralizadores são insumos regionais com potencial para desenvolver solos agrícolas de elevada fertilidade de longo prazo, que aumentam a sinergia entre a mineração e a agricultura desenvolvidas no Brasil.

## REFERÊNCIAS

AL RAWASHDEH, R. World peak potash: an analytical study. **Resources Policy**, v.69, Dec. 2020. Article 101834.

ANDRADE, L.R.M. de; MARTINS, E. de S.; MENDES, I. de C. **Avaliação de uma rocha ígnea como corretivo de acidez e disponibilização de nutrientes para as plantas**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 19p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 57).

ANUÁRIO ESTATÍSTICO 2021. Setor de Transformação de Não-Metálicos. Brasília, DF: MME-SGM, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos/anuario-estatistico-2021-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos-ano-base-2020.pdf>. Acesso em: 19 maio 2022.

ARRIETA, R.G. *et al.* Glauconitic siltstone as a source of potassium, silicon and manganese for flooded rice. **Journal of Agricultural Science**, v.12, n.9, p.96-105, 2020.

BALVANERA, P. *et al.* Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. **Ecology Letters**, v.9, n.10, p.1146-1156, 2006.

BRANTLEY, S. *et al.* **Frontiers in exploration of the critical zone**. Newark, DE: National Science Foundation, 2005. 30p. 2002.

BRASIL. Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980. Dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, destinados à agricultura, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 dez. 1980. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/1980-1988/l6894.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1980-1988/l6894.htm). Acesso em: 14 mar. 2022.

BRASIL. Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 11 dez. 2013. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2013/Lei/112890.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%2012.890%2C%20DE%2010,agricultura%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/Lei/112890.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%2012.890%2C%20DE%2010,agricultura%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias). Acesso em: 14 mar. 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016. Estabelece regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p.10, 14 mar. 2016. Disponível em: <https://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAtto.do?method=consultarLegislacaoFederal>. Acesso em: 19 maio de 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **[Registros de remineralizadores: indicadores da agricultura – fertilizantes]**. Brasília, DF: MAPA, 2022. Disponível em: <https://indicadores.agricultura.gov.br/fertilizantes/index.htm>. Acesso em: 19 maio 2022.

BRUNDRETT, M.C. Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. **New Phytologist**, v.154, n.2, p.275-304, 2002.

BUSATO, J.G. *et al.* Can co-application of silicate rock powder and humic-like acids increase nutrient uptake and plant growth in weathered tropical soil? **Acta Agriculturae Scandinavica**. Section B - Soil & Plant Science, v.72, n.1, p.761-774, 2022.

CARDINALE, B.J. *et al.* Biodiversity loss and its impact on humanity. **Nature**, v.486, n.7401, p.59-67, 2012.

CLARKE, F.W.; WASHINGTON, H.S. **The composition of the earth's crust**. Washington: Government Printing Office, 1924. 117p. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/pp/0127/report.pdf>. Acesso em: 20 maio 2022.

CONCEIÇÃO, L.T. *et al.* Potential of basalt dust to improve soil fertility and crop nutri-

- tion. **Journal of Agriculture and Food Research**, v.10, Dec. 2022. Article 100443.
- CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHA-GEM, 1., 2009, Brasília, DF. **Anais [...]**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2010. 321p. Disponível em: [https://www.cpac.embrapa.br/publico/usuarios/uploads/fotos\\_juliana/Anais%20I%20Congresso%20Brasileiro%20de%20Rochagem.PDF](https://www.cpac.embrapa.br/publico/usuarios/uploads/fotos_juliana/Anais%20I%20Congresso%20Brasileiro%20de%20Rochagem.PDF). Acesso em: 14 mar. 2022.
- CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHA-GEM, 2., 2013, Poços de Caldas. **Anais [...]**. Visconde do Rio Branco. Suprema, 2013. 399p. Disponível em: [https://www.cprm.gov.br/remineralizadores/media/anais\\_IICbr\\_2013.pdf](https://www.cprm.gov.br/remineralizadores/media/anais_IICbr_2013.pdf). Acesso em: 19 maio 2022.
- CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHA-GEM, 3., 2016, Pelotas. **Anais [...]**. Assis: Triunfal Gráfica e Editora, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documentos/1354346/13725119/1+circular+III+CBR/e58ae99c-98df-478f-98a5-48b1c2fa21b3>. Acesso em: 14 mar. 2022.
- CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHA-GEM, 4., 2021, [on-line]. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Autografia, 2021. 319p. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/358415358\\_ebook-Anais\\_do\\_IV\\_Congresso\\_Brasileiro\\_de\\_Rochagem](https://www.researchgate.net/publication/358415358_ebook-Anais_do_IV_Congresso_Brasileiro_de_Rochagem). Acesso em: 14 mar. 2022.
- CRUSCIOL, C.A.C. *et al.* Broadcast application of ground silicate rocks as potassium sources for grain crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.57, 2022. e02443.
- DAMETO, L.S.; MORAES, L.A.C.; MOREIRA, A. Effects of boron sources and rates on grain yield, yield components, nutritional status, and changes in the soil chemical attributes of soybean. **Journal of Plant Nutrition**, v.46, n.9, p.2077-2078, 2023.
- EDWARDS, D.P. *et al.* Climate change mitigation: potential benefits and pitfalls of enhanced rock weathering in tropical agriculture. **Biology Letters**, v.13, n.4, Apr. 2017. 20160715.
- EMBRAPA; CPRM. **Zoneamento Agrogeológico do Brasil, escala 1:1.000.000**: resumo executivo. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018. 17p. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/imprensa/pdf/zag181205.pdf>. Acesso em: 19 maio 2022.
- FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. **Advances in Agronomy**, v.99, p.345-399, 2008. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00407-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00407-0). Acesso em: 14 mar. 2022.
- FINLAY, R.D. *et al.* Reviews and syntheses: biological weathering and its consequences at different spatial levels - from nanoscale to global scale. **Biogeosciences**, v.17, n.6, p.1507-1533, 2020.
- FOLEY, J.A. *et al.* Global consequences of land use. **Science**, v.309, n.5734, p.570-574, 2005.
- GAO, W. *et al.* Ammonium fertilization causes a decoupling of ammonium cycling in a boreal forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v.101, p.114-123, Oct. 2016.
- GOLDSCHIEDER, N. *et al.* Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. **Hydrogeology Journal**, v.28, n.5, p.1661-1677, Aug. 2020.
- GRACE, J. *et al.* Productivity and carbon fluxes of tropical Savannas. **Journal of Biogeography**, v.33, n.3, p.387-400, Mar. 2006.
- GUNNARSEN, K.C. *et al.* Glacially abraded rock flour from Greenland: potential for macronutrient supply to plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.182, n.5, p. 846-856, Oct. 2019.
- KALINOWSKI, B.E.; SCHWEDA, P. Kinetics of muscovite, phlogopite, and biotite dissolution and alteration at pH 1-4, room temperature. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.60, n.3, p.367-385, Feb. 1996.
- KRAHL, L.L. **Mineral formation and element release from aluminosilicate rocks promoted by maize rhizosphere**. 2020. 104p. Thesis (Doctor in Environmental Sciences) – University of Brasília, Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://repositorio.umb.br/handle/10482/38678>. Acesso em: 19 maio 2022.
- KRAHL, L.L. *et al.* Increase in cation exchange capacity by the action of maize rhizosphere on Mg or Fe biotite-rich rocks. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.52, 2022. e72376.
- KRINGS, M. *et al.* Fungal endophytes in a 400-million-yr-old land plant: infection pathways, spatial distribution, and host responses. **New Phytologist**, v.174, n.3, p.648-657, May 2007.
- LAMBERS, H. *et al.* Plant-microbe-soil interactions in the rhizosphere: an evolutionary perspective. **Plant and Soil**, v.321, n.1/2, p.83-115, Aug. 2009.
- LI, T. *et al.* A nano-scale study of the mechanisms of non-exchangeable potassium release from micas. **Applied Clay Science**, v.118, p.131-137, Dec. 2015.
- LOPES, V.A. *et al.* Phosphorus acquisition from phosphate rock by soil cover crops, maize, and a buckwheat-maize cropping system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.79, n.4, 2022. e20200319.
- MANNING, D.A.C.; THEODORO, S.H. Enabling food security through use of local rocks and minerals. **The Extractive Industries and Society**, v.7, n.2, p.480-487, Apr. 2020.
- MINASNY, B. *et al.* Applying volcanic ash to croplands: the untapped natural solution. **Soil Security**, v.3, June 2021. 100006.
- MORETTI, L.G. *et al.* Dunite solubilization kinetics in silicon-magnesium fertilization. **Journal of Plant Nutrition**, v.44, n.1, p.1-12, Mar. 2021.
- NOGUEIRA, T.A.R. *et al.* Nepheline syenite and phonolite as alternative potassium sources for maize. **Agronomy**, v.11, n.7, July 2021. 11071385.
- RAYMUNDO, V. *et al.* Resíduos de serra-gem de mármore como corretivo da acidez de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.1, p.47-53, jan. 2013.
- RESENDE, A.V. de *et al.* Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, Viçosa, MG, v.30, n.3, p.453-466, jun. 2006.
- ROCHA, I.T.M. *et al.* Mineral gypsum (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), a promoter of biomass production of sweet sorghum. **Australian Journal of Crop Science**, v.8, n.12, p.663-1670, 2014.
- SANTOS, L.F. dos *et al.* Effects of biotite syenite on the nutrient levels and electrical charges in a Brazilian Savanna Ferralsol. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.51, 2021. e66691. Special Supplement: Cerrado [Brazilian Savanna].
- SILVA, R.C. da; FERREIRA, E.P.; AZEVEDO, A.C. de. Weathering features of a remineralizer in soil under different land uses. **Pes-**

**quisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.56, 2021.e01442.

SORATTO, R.P. *et al.* Eficiência e efeito residual de fontes alternativas de potássio em culturas graníferas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.56, 2021a. e02686.

SORATTO, R.P. *et al.* Silicate rocks as an alternative potassium fertilizer for upland rice and common bean crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.56, 2021b. e01411.

SOUSA, D.D. *et al.* Métodos para determinar as necessidades de calagem em solos dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, Viçosa, MG, v.13, p.193-198, 1989.

SWOBODA, P.; DÖRING, T.F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: a review. **Science of The Total Environment**, v.807, part.3, Feb. 2022. 150976.

TARDY, Y.; DUPLAY, J. A method of estimating the gibbs free energies of formation of hydrated and dehydrated clay minerals. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.56, n.8, p.3007-3029, Aug. 1992.

WALAN, P. *et al.* Phosphate rock production and depletion: regional disaggregated modeling and global implications. **Resources, Conservation and Recycling**, v.93, p.178-187, Dec. 2014.

WEDEPOHL, K.H. The composition of the continental crust. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.59, n.7, p.1217-1232, Apr. 1995.

WIELAND, E.; WEHRLI, B.; STUMM, W. The coordination chemistry of weathering: III - a generalization on the dissolution rates of minerals. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.52, n.8, p.1969-1981, Aug. 1988.

WINOGRADOW, A.P. **Geochemieseltener und nur in spuren vorhanden er chemischer elemente im boden**. Berlin: The Gryter, 1954.

YAROSHEVSKY, A.A.; BULAKH, A.G. The mineral composition of the earth's crust, mantle, meteorites, moon, and planets. *In*: MARFUNIN, A.S. (ed.). **Composition, structure, and properties of mineral matter**: concepts, results and problems. Berlin: Springer-Verlag, 1994. p.27-36. (Advanced Mineralogy, 1). Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-78523-8\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-78523-8_3). Acesso em 14 mar. 2022.

Veja no próximo

# INFORME AGROPECUÁRIO

## Bioinsumos: das biofábricas à produção nas propriedades rurais

**Boas práticas na produção e utilização dos insumos microbiológicos na agricultura**

**Biofábricas de ácaros predadores e de agentes de controle biológico de doenças de plantas**

**Compostos e vermicompostos enriquecidos com pós de rocha**

**Criação massal de joaninhas em biofábricas**

**Biofábricas de parasitoides e predadores**

**Insetos como bioinsumos para alimentação animal**

Leia e Assine o  
**INFORME AGROPECUÁRIO**  
**(31) 3489-5002**

**livraria@epamig.br**  
**www.livrariaepamig.com.br**