

Classificação dos remineralizadores *Stonemeal classification*

Roberto de Siqueira Corrêa¹, Claudinei Gouveia de Oliveira²

¹ Explora Consultoria em Mineração e Meio Ambiente - Complexo Brasil 21, E, 1410, Brasília, DF, BR.
(robertodesiqueiracorrea@gmail.com)

² Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Campus Asa Norte, Brasília, DF, BR.
(gouveia@unb.br)

Recebido em 26 de fevereiro de 2024; aceito em 04 de julho de 2024.

RESUMO

Considerando a necessidade de organização e alinhamento entre termos geológicos, agrônômicos e comerciais, é proposta uma classificação qualitativa de fácil compreensão, facilitando a comunicação e eliminando ambiguidades e terminologias inapropriadas para os remineralizadores. Esse tipo de insumo consiste em materiais geológicos cujo único processo de beneficiamento é a cominuição, com aplicação *in natura* nos solos agrícolas. Propõe-se, com base em critérios mineralógicos e geoquímicos, que os remineralizadores que apresentem concentrações de minerais ricos em determinados elementos e, conseqüentemente, altos teores geoquímicos, sejam subdivididos em: Primários, para K e/ou P; Secundários, para Ca e/ou Mg; Integrais, para os que atendem a todas as características dos primários e secundários; e Universais, para os que atendem aos critérios mínimos da legislação, mas que não possuem altos teores de nenhum macronutriente. Os critérios para a classificação são qualitativos, buscando ser orientativos, adaptando-se a mudanças mercadológicas e legislativas.

Palavras-chave: Remineralizador; Fertilizante mineral simples; Agricultura sustentável; Agrogeologia; Agrominerais.

ABSTRACT

An unprecedented classification scheme for stonemeal is proposed in this work, unifying agrogeological and commercial nomenclatures, adopting qualitative criteria and removing ambiguities and inappropriate terms while aiming to facilitate the communication between different fields of knowledge. Stonemeal consists in powdered rocks enriched in K, Ca and/or Mg that are directly applied in the field for crop nutrition. The classification proposal is based both on geochemistry and mineralogy, dividing products in four categories: Primary, for those that have high K and/or P contents; Secondary, for the ones that contain high Ca and/or Mg values; Whole, for those that have high values for both Primary and Secondary classes; and Universal, for the products that have low macronutrient contents, but that still can be commercialized according to legal determinations. The criteria used for the classification are qualitative, in a sense that they can be adapted to changes in market and legal conditions.

Keywords: Stonemeal; Simple mineral fertilizer; Sustainable agriculture; Agrogeology; Agrominerals.

INTRODUÇÃO

Desde os trabalhos pioneiros com remineralizadores no Brasil e no mundo até a atualidade, buscou-se comprovar a sua eficácia, com o intuito de legitimar uma prática inovadora e sustentável que configura uma alternativa aos insumos agrícolas tradicionais (Ilchenko, 1955; Leonardos et al., 1976, 1987). No sentido mais amplo e abrangente, remineralizadores, também conhecidos como pó de rocha e produtos da técnica de *stonemeal*, correspondem aos materiais geológicos que, após lavrados, são submetidos apenas a processos mecânicos de cominuição e são aplicados *in natura* no solo. Nesse sentido, diferem dos fertilizantes sintéticos porque estes são submetidos a processos de beneficiamento físico e químico, que extraem dos minerais os elementos químicos de interesse e os disponibilizam em compostos de alta solubilidade. Como exemplo, pode ser citado o beneficiamento da carnalita, onde o K é extraído do mineral e comercializado como um sal (KCl).

Dependendo do tipo de rocha, é possível realizar o manejo dos parâmetros físico-químicos do solo, envolvendo:

- i) a disponibilização de macro e micronutrientes, reflexo direto da assembleia mineralógica da rocha;
- ii) a correção da acidez do solo, propiciando aumento de pH;
- iii) o aumento da capacidade de troca catiônica (CTC), potencializando a retenção e diminuindo a lixiviação de nutrientes (Van Straaten, 2007; Martins et al., 2010; Souza et al., 2017).

Entretanto, os remineralizadores não são insumos que funcionam de maneira isolada na natureza, pois a sua eficiência é controlada por processos intempéricos, que configuram um somatório de fatores, onde se destacam a natureza do solo e a sua microbiota; as características fisiográficas; o clima, em especial as taxas anuais de temperatura e pluviosidade; e até mesmo o tipo de cultura em que é aplicado (Theodoro, 2000; Theodoro et al., 2013; Meena et al., 2014; Martins et al., 2015; Souza et al., 2017).

Atualmente, num período de eficácia comprovada por milhares de pesquisas, há um mercado ainda embrionário, mas já consolidado, que possui projeções de aumentos exponenciais de demanda e consumo para as próximas décadas (Theodoro e Leonardos, 2011; SEAE, 2022). Considerando os contextos passado, presente e futuro, bem como o caráter transdisciplinar dos remineralizadores, o presente trabalho consiste numa sugestão de classificação, com o intuito de sintetizar, de maneira clara e simples, a natureza dos materiais geológicos e os seus benefícios para o solo, bem como tornar as comunicações acerca desse tema acessíveis para pessoas de diferentes áreas do conhecimento e graus de instrução.

Outro objetivo concernente à proposta diz respeito a evitar termos comerciais, que comumente causam problemas de interpretação e comunicação, principalmente entre agrônomos, geólogos e agricultores, por não seguirem critérios técnicos ou científicos. Como exemplos, podem ser citados os kamafugitos, que podem conter ou não P_2O_5 ; ou mica

xistos, que podem atuar como excelentes remineralizadores ou serem tóxicos para o solo, a depender da sua composição mineralógica. Ao mesmo tempo, a classificação não utiliza terminologias específicas da Geologia, como nomes ou agrupamentos de rochas ou minerais, mas reconhece, de maneira implícita, as variações no valor mineralógico, geoquímico e agrônômico que uma rocha pode apresentar.

Por fim, a classificação busca adotar parâmetros resistentes à passagem do tempo, de modo que ela não seja afetada pelo mercado, com flutuações e especulações, nem por mudanças legislativas. Nesse sentido, não foram adotados critérios quantitativos para os macronutrientes na classificação, buscando servir como uma proposta orientadora, adaptável às condições de cada época e região. Adicionalmente, a proposta é voltada para o contexto brasileiro, mas os conceitos adotados, por serem de ampla aceitação, possuem potencial de aplicação global, ou, ao menos, para regiões de climas similares aos do Brasil.

A MINERALOGIA POR TRÁS DOS REMINERALIZADORES

Considerando o contexto dos solos tropicais brasileiros, que contam com aproximadamente 300 milhões de hectares de latossolos (Lepsch, 2010), onde predominam processos de monossialitização e alitização, há uma constante necessidade de aporte de nutrientes de fontes externas para a prática de atividades agropecuárias. Desse modo, macronutrientes primários, representados por nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K); secundários, definidos por cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S); além de micronutrientes, como boro (B), cloro (Cl), molibdênio (Mo), cobre (Cu), ferro (Fe), zinco (Zn), manganês (Mn) e níquel (Ni); e outros elementos que contribuem para o desenvolvimento das plantas, como silício (Si); são obtidos por diferentes processos, mas a maioria deles é oriunda do meio geológico. A concentração desses elementos no solo se dá em minerais — sejam eles primários (i.e., oriundos da rocha-mãe) ou neoformados (i.e., produzidos a partir de alterações intempéricas) —, e sua mobilidade e disponibilidade varia com as condições externas, como grau de oxidação, pH, capacidade de troca catiônica (CTC), temperatura, índice de pluviosidade, umidade, entre outros fatores, que são dependentes da interação do solo com a hidrosfera, atmosfera e biosfera. Como exemplo, Bell et al. (2021) elencam seis tipos de reservatório de K nos solos, apresentando ampla variação de disponibilização, um fator altamente dependente da sua mineralogia. Portanto, considerando o contexto da fertilização dos solos, seja ela realizada a partir de materiais *in natura* ou beneficiados por processos industriais, a mineralogia dos insumos deve ser conhecida, para compreender o que se esperar de processos e produtos tanto antes quanto após a sua aplicação.

Para o contexto do presente trabalho, rochas podem ser definidas como materiais geológicos sólidos formados por um ou mais minerais. Estes, por sua vez, são divididos

em 12 classes, com base em ânions ou radicais aniônicos, onde a mais expressiva é a dos silicatos, por constituírem 92% dos minerais da crosta terrestre. Ainda assim, há muitos não-silicatos que possuem grande importância para a agricultura, tanto pelo aporte de nutrientes quanto pela manutenção das propriedades físico-químicas do solo. Dentre todas as suas propriedades, cabe destacar uma das mais importantes, que é do grau de solubilização, medido como a taxa de dissolução ou taxa de disponibilização de determinado elemento ao longo de um intervalo de tempo, reflexo direto das estabilidades distintas dos minerais frente ao intemperismo (Tabela 1). A seguir, as classes e suas subdivisões, como famílias, grupos e espécies, serão explicadas de maneira não-sistemática, buscando evidenciar seus respectivos potenciais para uso na agropecuária, conforme a ordem do quadro de susceptibilidade ao intemperismo (ou taxa de dissolução), da seguinte maneira:

- i) minerais de alta susceptibilidade ao intemperismo, incluindo haloides (e.g., cloretos), sulfatos, carbonatos e fosfatos (e.g., hidroxiapatita, carbonatoapatita), que são comumente usados nas formulações dos fertilizantes e corretivos de solos;
- ii) minerais de média susceptibilidade ao intemperismo, abarcando a maioria dos constituintes dos remineralizadores;
- iii) minerais de baixa susceptibilidade ao intemperismo,

incluindo alguns silicatos félsicos (e.g. feldspato potássico, muscovita, quartzo), além de minerais comumente encontrados nos solos tropicais (e.g. alguns hidróxidos de Fe, Al e Mn, e argilominerais).

Minerais de alta susceptibilidade ao intemperismo

Compreendem minerais ou grupos de minerais que, de maneira geral, já apresentam mercado consolidado tanto no âmbito nacional quanto no internacional. Possuem forte apelo para a agropecuária, principalmente devido à alta taxa de dissolução dos minerais frente às condições intempéricas do Brasil, com consequente liberação rápida de nutrientes. Destacam-se, neste grupo, as classes dos haloides, sulfatos, carbonatos e fosfatos, além de nefelina e glauconita (Tabela 1).

Haloides, haletos ou halogenetos

A classe dos haloides configura um dos mais notórios agrupamentos de minerais para uso na agropecuária. Possuem aplicação histórica e dominam o mercado global de insumos de K, entre outros macro e micronutrientes. Caracterizam-se pela formação de sais, por meio de ligações iônicas entre cátions monovalentes e divalentes, como K, Ca e Mg, com halogênios, onde se destaca o cloro (Cl). Dentre os produtos naturais mais utilizados, excluindo os

Tabela 1. Taxa de Dissolução de minerais escolhidos conforme sua relevância para utilização como remineralizadores. Informações extraídas de Lasaga et al. (1994) e Palandri e Kharaka (2004). Os dados apresentados servem meramente como referência geral, pois podem variar conforme as condições em que foram obtidos, além de pH e temperatura.

TAXA DE DISSOLUÇÃO (log mol.m ⁻² .s ⁻¹)	GRUPOS MINERAIS	USOS E OCORRÊNCIAS
ALTA (≥ -5,00)	Cloretos (silvita, carnalita) Sulfatos (gipsita, anidrita, polihalita, kainita) Carbonatos (calcita, dolomita, magnesita) Fosfatos (carbonatoapatita, hidroxiapatita) Nefelina Vidro vulcânico Micas (glauconita)	A maior parte da produção mundial de potássio provém de evaporitos (i.e., cloretos e sulfatos), enquanto os fertilizantes fosfatados são produzidos predominantemente a partir de fosforitos sedimentares e carbonatitos. Carbonatos e sulfatos são associados principalmente a rochas sedimentares e metamórficas e amplamente utilizados para a correção da acidez do solo, além de fontes de Ca e Mg.
MÉDIA (<-5,00 e ≥-10,00)	Feldspatoides (leucita, kalsilita) Zeólitas Olivinas (forsterita) Plagioclásios cálcicos (anortita-labradorita) Piroxênios (diopsídio-hedenbergita, egrina-augita) Anfibólios (tremolita-actinolita, hornblenda) Epidoto (zoisita) Micas (biotita-flogopita) Plagioclásios sódicos (andesina-albita) Sulfetos (pirita, pirrotita, calcopirita) Óxidos (hematita, magnetita)	A maioria dos remineralizadores é composta por minerais silicáticos, que apresentam taxa de dissolução intermediária e que têm como função alterar os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promover a melhoria das propriedades físicas, físico-químicas ou da atividade biológica do solo. Esses remineralizadores são representados por um amplo espectro composicional (químico e mineralógico) de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares.
BAIXA (<-10,00)	Feldspatos potássicos (microclínio, ortoclásio, sanidina) Micas (muscovita) Filossilicatos (pirofilita, talco, clorita, serpentina) Argilominerais (esmectita, illita, caulinita) Quartzo Hidróxidos (gibbsita, goethita, limonita)	Os grupos minerais que apresentam taxa de dissolução baixa (feldspato potássico, muscovita e quartzo) estão associados a um volumoso conjunto de rochas félsicas (ígneas, metamórficas e sedimentares), representadas em grande proporção por granitos, gnaisses e quartzitos.

fertilizantes industriais, destacam-se a silvita (KCl) e a carnalita [$\text{KMgCl}_3 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$]. A grande vantagem de aplicação desses sais se dá no seu processo de dissolução, que, assim que entram em contato com a água, liberam cátions, apresentando as mais rápidas taxas de dissolução, permitindo que os nutrientes fiquem prontamente disponíveis para as plantas. Por outro lado, a rápida dissolução desse tipo de insumo pode configurar uma desvantagem, dado que as plantas podem não conseguir absorver toda a quantidade de nutrientes liberados e, conseqüentemente, o escoamento e a lixiviação dos sais podem causar impactos ambientais negativos (Savci, 2012). Em termos de formação, depósitos de sais de K e outros elementos geralmente estão associados a rochas sedimentares marinhas do tipo evaporito, definido por estratos formados exclusivamente por sais a partir da evaporação da água. Por esse motivo, possuem ocorrência restrita e são extremamente raros em outros tipos de rocha, não apresentando vocação para uso como remineralizador de solos.

Em termos mercadológicos, a forte dependência do Brasil por insumos importados de potássio, em sua maioria na forma de sais (Plano Nacional de Fertilizantes, SEAE, 2022), deve-se, principalmente, à alta reatividade dessa classe de minerais. Atualmente, as maiores reservas globais concentram-se no Canadá e na Bielorrússia, que consistem nos principais *players* de um mercado que produz, anualmente, 66 milhões de toneladas (USGS, 2023).

Fosfatos

Os minerais pertencentes à classe dos fosfatos, assim como no caso dos haloides, apresentam-se como insumos bastante consolidados no mercado, constituindo as principais fontes de P no contexto de fertilizantes, seja através da utilização *in natura* ou de beneficiamento por processos industriais. Caracterizam-se pelo radical aniônico (PO_4)³⁻, geralmente ligado a cátions: no caso do fosfato mais comum, a apatita, de fórmula $\text{Ca}_5\text{PO}_4(\text{F},\text{Cl},\text{OH})$, também há ligação com ânions de halogênios ou hidroxila numa estrutura cristalina hexagonal. Os fosfatos ocorrem em uma ampla diversidade de ambientes geológicos, com destaque, por sua relevância econômica, para rochas fosfáticas sedimentares e magmáticas, que podem apresentar concentrações de P_2O_5 de 4% a 20%. As sedimentares são associadas a fosforitos, produtos de sedimentação marinha, onde destacam-se minerais como hidroxiapatita ($\text{Ca}_5\text{PO}_4\text{OH}$) e fluorapatita ($\text{Ca}_5\text{PO}_4\text{F}$), esta também associado a carbonatos, na forma de francólita. As magmáticas, por sua vez, estão ligadas a complexos alcalino-carbonatíticos, em foscoritos ou carbonatitos, rochas de ocorrência rara com alta concentração de minerais fosfáticos. Apesar de estarem posicionados como minerais de alta solubilidade (Tabela 1), deve-se considerar que há uma grande variação na disponibilização de P para o solo a partir dessa classe de minerais. Primeiramente, como destacado por Chaves (2010), as variedades de maior solubilidade correspondem às ocorrências sedimentares, por possuírem

menor grau de cristalinidade e geralmente estarem associadas a carbonatos, como carbonato-fluorapatita (i.e., quando há substituição parcial de moléculas de PO_4 por CO_3). Em segundo lugar, a dissolução dos fosfatos é mais diretamente relacionada a processos de biointemperismo, através de ácidos húmicos, do que por processos de intemperismo químico. Desse modo, as variedades ígneas, apesar de conterem elevados teores de P_2O_5 , são compostas majoritariamente por fluorapatita, com baixa capacidade de liberação de P, e por isso possuem vocação para uso como fertilizante, e não como remineralizador de solos. Sob a ótica de remineralizadores, algumas rochas ultramáficas alcalinas podem apresentar concentrações elevadas de fosfatos (e.g., 3%), posicionando-as como excelentes insumos para aporte de P; entretanto, tais rochas possuem ocorrência limitada a poucos locais no Brasil e no mundo e, portanto, os fosfatos apresentam potencial restrito.

China, Marrocos e Estados Unidos respondem por mais da metade da produção anual global, estimada em cerca de 220 milhões de toneladas (USGS, 2023). O Brasil, apesar de contar com reservas expressivas de fosfato magmático, ainda necessitou importar, em 2020, 72% dos insumos consumidos, refletindo a sua alta dependência do mercado externo. Um complicador adicional para a produção nacional de fertilizantes de P_2O_5 consiste na necessidade de processamento do minério com enxofre, *commodity* que também possui expressivo fornecimento do mercado externo (Plano Nacional de Fertilizantes, SEAE, 2022).

Sulfatos

Os sulfatos são representados por minerais cujo radical aniônico é o SO_4^{2-} , indicativo do S na sua forma oxidada. Este complexo tende a se ligar com cátions divalentes, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} e Ba^{2+} , mas, também, pode se associar a monovalentes, como Na^+ e K^+ . A maioria dos minerais dessa classe tende a se solubilizar na presença de água, dissociando os cátions do complexo aniônico. Outros, por sua vez, hidratam-se, como é o caso da transformação da anidrita (CaSO_4) em gipsita [$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$]. Na agropecuária, essa classe possui potencial tanto para aporte de macronutrientes, como K, Ca, Mg e S, quanto de micronutrientes, além de atuarem como condicionadores de solos. Dentre os minerais com maior potencial para esses fins, destaca-se a polialita ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sulfato de estrutura complexa de alta solubilidade e rapidez de liberação de nutrientes (Molin et al., 2020). Os sulfatos possuem maior variabilidade de ambientes de formação do que os haloides, podendo ocorrer não só em formações evaporíticas, mas, também, por meio da oxidação de sulfetos e como minerais acessórios em rochas vulcânicas. Por essa razão, apresentam vocação para uso como fertilizante, em rochas com grandes concentrações desses minerais, ao passo que sua aplicação em remineralizadores é bastante limitada, ainda que, para o caso dos oriundos de rochas vulcânicas, os sulfatos sejam mais expressivos do que os haloides.

O mercado de sulfatos no contexto de fertilizantes assemelha-se, em parte, ao dos halogenetos, dado que ambas as classes podem ocorrer associadas em determinadas minas. Em outros contextos geológicos, há sulfatos de K, Ca e Mg, entre outros elementos, ocorrendo de maneira isolada.

Carbonatos

Carbonatos compreendem minerais ligados ao radical aniônico (CO_3^{2-}), apresentando, como minerais mais comuns, a calcita (CaCO_3) e a dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]. Os minerais dessa classe apresentam solubilidade intermediária entre os haloides e os silicatos, principais constituintes dos remineralizadores. As rochas portadoras desses minerais — calcários e dolomitos — contribuem com o aporte de Ca e Mg para o solo, com rápida disponibilização de cátions, mas sua principal utilização se dá como condicionares de solos, regulando o seu pH. Esta propriedade se dá devido ao processo de dissolução dos carbonatos, aumentando o pH através da formação de ácido carbônico (H_2CO_3) e de bicarbonato (HCO_3^-). No meio geológico, os carbonatos possuem ampla ocorrência, sendo formados tipicamente por processos de sedimentação química orgânica e inorgânica. Devido à facilidade de dissolução e precipitação desses minerais, apresentam uma tendência de alta mobilidade, formando veios, vênulas e vesículas em alguns tipos de rochas magmáticas e metamórficas. Adicionalmente, ocorrem como minerais formadores de rochas silicáticas de diferentes origens. Por esse motivo, a classe dos carbonatos posiciona-se globalmente como os principais reguladores de solos através de rochas monominerálicas, mas, também, apresenta uma forte sinergia para uso como remineralizador no contexto de rochas silicáticas, onde podem ocorrer como minerais principais ou acessórios.

O mercado para calcário e dolomito, bem como suas variedades metamórficas, mostra-se extremamente regionalizado, geralmente tendo como limitadores principais a sua composição química, o seu grau de pureza e o custo de transporte. Segundo dados da Agência Nacional de Mineração, há reservas da ordem de 100 bilhões de toneladas para esse tipo de rocha; e dados de produção e consumo anual situam-se aproximadamente em 56 milhões de toneladas (ABRACAL, 2023).

Nitratos

Minerais da classe dos nitratos são caracterizados pelo radical aniônico NO_3^- . Possuem ocorrência geológica extremamente restrita e são pouco comercializados, apesar do nitrogênio configurar um dos três principais nutrientes para a agropecuária. Os fertilizantes nitrogenados são fabricados pelo processo Haber-Bosch, que utiliza metano do gás natural e N atmosférico para produzir amônia e posteriormente ureia. Estes insumos movimentam anualmente um mercado de 150 milhões de toneladas, tendo como principais produtores China, Rússia, Índia e Estados Unidos (USGS, 2023).

Apesar de contar com unidades produtoras, o Brasil ainda importa mais de 90% desse tipo de insumo (Plano Nacional de Fertilizantes, SEAE, 2022). Visando o uso em remineralizadores, a maior parte das rochas silicáticas não possui minerais que contenham N, e, por isso, seu potencial nesse contexto é extremamente baixo.

Nefelina, glauconita e vidro vulcânico

A nefelina é potencialmente uma fonte importante de K dada a sua taxa de dissolução relativamente alta ($-2,73 \log \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; Palandri e Kharaka, 2004). Esse mineral encontra-se amplamente associado a rochas alcalinas da série nefelinitica (e.g. nefelinito, urtito, ijolito, nefelina sienito, fonolito), que têm sido localmente utilizadas como remineralizadores potássicos.

A glauconita é uma outra fonte importante de K e se destaca também por apresentar taxa de dissolução alta ($-4,80 \log \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; Palindra e Kharaka, 2004). A glauconita integra o grupo das micas da subclasse dos filossilicatos. Sua estrutura cristalina é similar à da biotita, evidenciada pela intercalação de uma folha octaédrica com duas tetraédricas. No entanto, esse empilhamento mostra-se frequentemente desordenado pela presença de camadas interestratificadas de esmectita. A glauconita ocorre comumente associada a sedimentos depositados em águas rasas da plataforma continental.

Cabe, ainda, menção ao vidro vulcânico, material geológico que não se enquadra na definição de mineral, por não apresentar retículo cristalino. Como um sólido amorfo, representa a composição do magma no momento da solidificação, e por isso não possui composição específica, podendo conter bons teores de um ou mais nutrientes. Assim como a nefelina, o vidro vulcânico, mais especificamente o vidro basáltico, apresenta taxa de dissolução relativamente alta ($-3,30 \log \text{mols m}^{-2} \text{s}^{-1}$; Lewis et al., 2021), o que compensa a sua utilização como um remineralizador eficiente, mesmo não contendo valores elevados de P ou K. Nesse sentido, as rochas vulcânicas com solidificação muito rápida podem conter altas proporções de vidro, como, por exemplo, riolitos e dacitos, mostrando alto potencial para formar remineralizadores com liberação de nutrientes mais rápida.

Minerais de média susceptibilidade ao intemperismo

A classe dos silicatos, por ser a mais abundante na crosta terrestre, será detalhada conforme as suas subclasses com agrominerais de maior destaque, notadamente os nesossilicatos, inossilicatos de cadeia simples e dupla, filossilicatos 2:1 e 1:1, e tectossilicatos. Os minerais pertencentes a essa classe possuem o radical aniônico $(\text{SiO}_4)^{4-}$, formando distintos arranjos de tetraedros com base no grau de compartilhamento de O na sua estrutura. Ressalta-se que, pela diversidade mineralógica, há espécies minerais de suscep-

tibilidade ao intemperismo média e baixa dentro das mesmas subclasses, ainda que, de maneira geral, os silicatos estejam situados no campo médio. No contexto de remineralizadores, os minerais dessa classe são os principais componentes dos produtos, dado que estes são produzidos a partir de rochas silicáticas. Adicionalmente, a susceptibilidade média ao intemperismo lhes confere a propriedade de promover uma liberação lenta, porém prolongada, de nutrientes, permitindo que as plantas possam absorvê-los de maneira mais equilibrada e que os elementos químicos se alojem em reservatórios com disponibilidade de nutrientes e aumento de CTC, com menor propensão à lixiviação (Harley e Gilkes, 2000; Castro e Crusciol, 2013).

O mercado de remineralizadores, ao menos no contexto nacional, possui tendência de ser regionalizado, com insumos produzidos relativamente próximos a centros agrícolas. Nesse sentido, assemelha-se em parte ao mercado de calcário, tendo o custo de transporte como um dos principais limitadores para a sua comercialização em grandes distâncias. Apesar disso, devido à grande variabilidade geoquímica e mineralógica dos insumos, é possível que haja uma maior tolerância aos custos de frete para produtos que tenham capacidade de suprir deficiências críticas dos solos de determinadas regiões. Segundo dados da ABREFEN e do Plano Nacional de Fertilizantes, as projeções de produção anual para 2030 e 2050 são, respectivamente, 3 e 18 milhões de toneladas; aumentos expressivos em relação à produção anual de 2020, que correspondeu a 1,5 milhões de toneladas.

Grupo das olivinas

O grupo das olivinas está inserido na subclasse dos nesosilicatos, que se caracterizam por formarem estruturas sem compartilhamento de O entre os tetraedros, resultando na razão Si:O de 1:4. Dentre os minerais dessa subclasse, o grupo das olivinas se destaca tanto em termos de abundância quanto pelo seu potencial de eficiência agrônômica. O grupo caracteriza-se por conter minerais insaturados em sílica (i.e., num magma, reagem com SiO₂ para formar outros minerais), fator que possui relação direta com sua maior susceptibilidade ao intemperismo. A rigor, a olivina representa uma solução sólida completa de minerais entre os “membros finais” magnesiano (forsterita) e ferroso (faialita), de fórmula (Mg,Fe)₂SiO₄. Há, ainda, variedades cálcicas e manganíferas, entre outros elementos, que, embora possuam forte apelo para uso em remineralizadores, são bastante raras. No contexto de remineralizadores, há rochas ultramáficas com elevado conteúdo de olivina, como dunitos e peridotitos, além de olivina melilitos, e rochas portadoras de olivina, como algumas rochas máficas e extrusões alcalinas, ou mesmo mármores impuros metamorfizados em alto grau. Desse modo, a olivina apresenta potencial para uso agrônômico como fonte de Mg e Fe, e para melhorar as características físico-químicas do solo, ainda que sua ocorrência seja restrita a poucos tipos de rocha na crosta terrestre (Almeida et al., 2022).

Grupos dos piroxênios e anfibólios

Os grupos dos piroxênios e anfibólios pertencem à subclasse dos inossilicatos, caracterizada por minerais que apresentam arranjos de tetraedros em cadeias (ou correntes), o que geralmente está associado com o desenvolvimento de hábito prismático nos cristais. São subdivididos em inossilicatos de cadeia simples e dupla, englobando, respectivamente, os grupos dos piroxênios e dos anfibólios.

O grupo dos piroxênios corresponde a um amplo espectro de espécies minerais que possuem a razão Si:O de 1:3, tipicamente ferromagnesianos. Como exemplos, há a solução sólida entre os “membros finais” enstatita (Mg-SiO₃) e ferrosilita (FeSiO₃), representando os ortopiroxênios; podendo também apresentar afinidade cálcica, como a solução sólida entre diopsídio (CaMgSi₂O₆) e hedenbergita (CaFeSi₂O₆); sódica, como a solução sólida entre jadeíta (NaAlSi₂O₆) e egirina (NaFeSi₂O₆); e sódico-cálcica, de composições intermediárias (Morimoto et al., 1988). No âmbito dos remineralizadores, os piroxênios destacam-se por ocorrerem numa ampla gama de rochas ígneas e metamórficas, apresentando potencial para aporte de Mg, Fe e Ca, oferecendo maior resistência ao intemperismo comparativamente à olivina.

Os anfibólios, por sua vez, correspondem aos inossilicatos de cadeia dupla, de razão Si:O 4:11. Diferem do grupo dos piroxênios principalmente por terem uma fórmula estrutural mais complexa e por serem hidratados (i.e., contêm OH na fórmula). Como principais subgrupos, Hawthorne et al. (2012) destacam os de Mg-Fe-Mn, como a antofilita [\square Mg₂Mg₅Si₈O₂₂(OH)₂]; os cálcicos, como a tremolita [\square Ca₂Mg₅Si₈O₂₂(OH)₂] e a hornblenda [\square Ca₂(Mg₄Fe³⁺)(Si₇Al)O₂₂(OH)₂]; os sódicos, como a arfvedsonita [NaNa₂(Fe₂+4Fe³⁺)Si₈O₂₂(OH)₂], e os sódico-cálcicos, como a richterita [Na(NaCa)Mg₅Si₈O₂₂(OH)₂]. Pela sua grande diversidade de minerais, ocorrem em uma série de rochas magmáticas e metamórficas, de diferentes composições. Para uso como remineralizadores, o grupo dos anfibólios apresenta propriedades similares às dos piroxênios como fonte de Ca, Mg, Fe e Mn, com o adendo de que alguns anfibólios, notadamente os sódicos e sódico-cálcicos, podem conter teores relevantes de K₂O, já que o potássio pode substituir o sódio em determinados sítios cristalográficos.

Grupo das micas

As micas pertencem à subclasse dos filossilicatos, que reúne minerais que possuem estruturas em camadas, com razão Si:O de 2:5, com empilhamento de arranjos planares de tetraedros de SiO₄ (T) e de octaedros de Al₂(OH)₆ ou (Fe,Mg)₃(OH)₆ (O), desenvolvendo arranjos com repetição de camadas T-O, também conhecidos como filossilicatos 1:1, e T-O-T, como é o caso dos filossilicatos 2:1. O grupo das micas possui estrutura 2:1, com cátions entre as camadas T-O-T, com destaque para K⁺, a exemplo da biotita-flogopita [K(Fe,Mg)₃AlSi₃O₁₀(OH)₂], da muscovita

[KAl₂AlSi₃O₁₀(OH)₂] e da já mencionada glauconita [(K;Na)(Fe³⁺;Al;Mg)₂(Si;Al)₄O₁₀(OH)₂]. Por conterem cátions intercâmara, as micas promovem a disponibilização de nutrientes para o solo de maneira equilibrada ao longo do tempo, concomitantemente aumentando a CTC. Segundo Bell et al. (2021), os sítios intercâmara dos flossilicatos, com destaque para as micas, configuram um dos mais importantes reservatórios de K e outros macro e micronutrientes do solo, promovendo a sua retenção e consequentemente reduzindo a sua lixiviação. A biotita e a flogopita posicionam-se entre os melhores minerais para compor remineralizadores, por apresentarem as propriedades de:

- i) constituírem fontes de K, Mg e Fe;
- ii) apresentarem baixa resistência ao intemperismo;
- iii) formarem minerais secundários que possuem propriedades benéficas para o solo, como é o caso dos argilo-minerais expansivos.

A muscovita, por sua vez, apresenta maior dificuldade para liberar potássio por apresentar taxa de dissolução baixa (-11,85 log mols m⁻² s⁻¹; Lewis et al., 2021) e, consequentemente mais resistente ao intemperismo, o que promove o acúmulo de alumínio residual no solo. Em termos de distribuição geológica, as micas ocorrem em uma grande diversidade de ambientes, associadas a rochas ígneas, sedimentares, metamórficas e até mesmo hidrotermais, desde minerais acessórios até como componentes da mineralogia principal de determinada rocha.

Grupos dos feldspatos, feldspatoides e zeólitas

Para o contexto de remineralizadores, destacam-se, pelo potencial de eficiência agrônômica, os grupos dos feldspatos, dos feldspatoides e das zeólitas, todos pertencentes à subclasse dos tectossilicatos, caracterizada por minerais que desenvolvem redes tridimensionais de tetraedros de SiO₄, com compartilhamento de todos os O, resultando na razão Si:O de 1:2.

Os feldspatos compõem mais de 50% dos minerais da crosta terrestre, principalmente na forma de dois subgrupos: plagioclásio e feldspato alcalino. O plagioclásio consiste numa solução sólida completa entre os “membros finais” anortita (CaAl₂Si₂O₈) e albita (NaAlSi₃O₈), ao passo que o feldspato alcalino corresponde a uma solução sólida completa entre a albita e o feldspato potássico (KAlSi₃O₈). Apresentam destaque pela sua abundância, com ocorrência em uma ampla variedade de rochas magmáticas, metamórficas e sedimentares, e possuem resistência variável ao intemperismo, com os plagioclásios cálcicos sendo menos resistentes e os feldspatos sódicos e potássicos sendo mais estáveis. No caso do feldspato potássico, apresenta-se como fonte potencial de K, por conter aproximadamente 15% de K₂O em sua fórmula química, mas o alto conteúdo de SiO₂ e Al₂O₃ mostram-se como fatores negativos para a sua eficiência agrônômica, tanto por sua baixa taxa de dissolução (-10,09 log mols m⁻² s⁻¹; Lewis et al., 2021),

quanto por sua tendência de formar perfis residuais de caulinita e quartzo, empobrecendo o solo.

O grupo dos feldspatoides consiste em minerais insaturados em sílica, tendo, como principais espécies, a nefelina [(Na,K)AlSiO₄], a leucita (KAlSi₂O₆) e a kalsilita (KAlSiO₄). Por serem insaturados, são mais susceptíveis a reações intempéricas do que os feldspatos e, por conterem menos SiO₂ em sua fórmula, apresentam teores de K₂O mais elevados, superiores a 20%. Em contrapartida, são minerais raros, restritos a rochas ígneas alcalinas e a alguns tipos de rochas metamórficas de alto grau.

As zeólitas consistem num agrupamento de tectossilicatos que se destaca pelo desenvolvimento de sítios estruturais de grandes tamanhos, com alta CTC natural, garantindo-lhes a propriedade de absorver e adsorver íons e moléculas, como é o caso de Ca²⁺, K⁺, Na⁺ e H₂O. Nesse contexto, possuem aplicações industriais como filtros químicos, uso que também se adequa ao contexto de remineralizadores, não apenas para aumento da CTC, mas também para disponibilizar nutrientes de maneira equilibrada ao longo do tempo (Mihok et al., 2020). Esse grupo de minerais apresenta ocorrência geológica restrita, limitados ao preenchimento de vesículas de certas rochas vulcânicas, a zonas metamórficas de baixo grau e a algumas rochas sedimentares.

Sulfetos

A classe dos sulfetos possui como ânion o S em sua forma reduzida, em diferentes tipos de arranjos cristalográficos. O seu principal exemplo consiste na pirita, de fórmula FeS₂, com grau de simetria cúbico, que exemplifica a modalidade típica de formação dessa classe de minerais: um ou mais cátions (e.g., Fe, Cu, Zn, Pb, Mo, Bi, Sb, Hg, CuFe, FeAs, FeNi) formando ligações iônicas com S²⁻. Essa classe tende a ocorrer em depósitos minerais, associados a commodities como ouro e prata, ou diretamente como minerais-minério de Cu, Zn, Pb e Ni, por exemplo. Sua ocorrência pode se dar de maneira disseminada, na rocha hospedeira em pequenas proporções, ou maciça, com altas concentrações geralmente em camadas ou veios. De maneira geral, os sulfetos constituem fonte de S e micronutrientes, como Fe, Cu, Zn, Mo, mas deve-se atentar para contaminantes, como Pb ou Hg. Como esses insumos, no contexto de remineralizadores, competiriam com o tradicional mercado de metais base e preciosos, a sua viabilização pode ocorrer:

- i) principalmente, através do aproveitamento de co-produtos ou subprodutos de mineração, com baixos custos de produção e concentração dos insumos; ou
- ii) em projetos anti-econômicos para metais, mas que sejam viáveis para remineralizadores.

Minerais de baixa susceptibilidade ao intemperismo

Além dos silicatos félsicos (feldspato potássico, muscovita, quartzo), já mencionados no item anterior, parte dos

filossilicatos 2:1, como o grupo do talco e o da clorita, bem como os filossilicatos 1:1, tendem a apresentar relativa estabilidade ao intemperismo, ainda que sua resistência ao intemperismo possa variar em diferentes ambientes (Deer et al., 2013). Por esse motivo, mesmo que contenham nutrientes como Mg e Fe, estes podem estar virtualmente indisponíveis para as plantas por estarem aprisionados na estrutura dos minerais. Adicionalmente, parte desses minerais pode ocorrer como minerais primários (i.e., constituintes da rocha inalterada) ou como secundários, sendo produtos do intemperismo. Ainda assim, por mais que esses grupos possam apresentar baixo potencial para o aporte de nutrientes provindos de suas estruturas cristalinas, há destaque para os argilominerais expansíveis, notadamente a vermiculita $[(Mg,Fe,Al)_3(Al,Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O]$ e a montmorillonita $[(Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10} \cdot nH_2O]$. O seu potencial se dá porque, na presença de água, esses argilominerais apresentam a propriedade de absorver moléculas de água no seu sítio intercamada, aumentando a sua distância interplanar. Assim, esses sítios também são capazes de absorver íons, contribuindo para a retenção de nutrientes e água, com liberação equilibrada ao longo do tempo, melhorando também a CTC do solo (Pereira et al., 2020; Bell et al., 2021).

Óxidos e hidróxidos abarcam duas classes de um amplo espectro de minerais que são caracterizados por ligações com o ânion O^{2-} e com hidroxila (OH^-), respectivamente (Klein e Dutrow, 2012). Para o contexto desse trabalho, ambos serão tratados de maneira conjunta porque, apesar de apresentarem ocorrência abrangente em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, eles geralmente estão fortemente associados aos produtos finais do intemperismo, com elevada estabilidade sob as condições da superfície terrestre. Como exemplos desses produtos, destacam-se a hematita (óxido de Fe férrico) e a gibbsita (hidróxido de Al), minerais bastante comuns em solos brasileiros bem desenvolvidos que marcam a remoção parcial ou, em alguns casos, completa de sílica (i.e., SiO_2) do perfil pedológico. Em relação ao seu potencial para uso como remineralizadores, condicionadores de solos ou fertilizantes, apresentam muitas limitações, principalmente por não conterem minerais portadores de macronutrientes primários e secundários com ampla ocorrência, mas também por apresentarem, de maneira geral, baixas taxas de dissolução.

CLASSIFICAÇÃO DOS REMINERALIZADORES

A classificação dos remineralizadores apresentada aqui adota, como base, a composição química das rochas, abordagem tradicional na Geologia, que ao mesmo tempo é simples e de fácil compreensão por profissionais de outras áreas. Tal abordagem permite sua aplicação em qualquer variedade de rocha, seja ela ígnea, sedimentar, metamórfica, ou até mesmo hidrotermal. Outra vantagem da opção pela classificação geoquímica baseia-se na correlação entre a disponibilização de elementos quí-

micos e a demanda por macro e micronutrientes de solos e culturas. Desse modo, há a facilitação do processo de escolha de produtos: se o consumidor busca exclusivamente um remineralizador rico em um determinado elemento químico, a classificação atua como um filtro, permitindo a seleção de insumos dentro dessa categoria. Dessa forma, os remineralizadores são classificados ou agrupados em um diagrama ternário PKCa-Mg de acordo com o seu conteúdo de macronutrientes primários [fósforo (P), potássio (K)] e secundários [cálcio (Ca) e/ou magnésio (Mg)], elementos essenciais para as plantas e tradicionalmente abordados na literatura agrônômica (Figura 1). O nitrogênio (N) não é considerado nesta classificação porque o seu ciclo está mais ligado a processos orgânicos, bióticos e atmosféricos do que a processos geológicos, onde predominam processos inorgânicos e, portanto, a ocorrência de rochas ou minerais portadores de N é muito restrita.

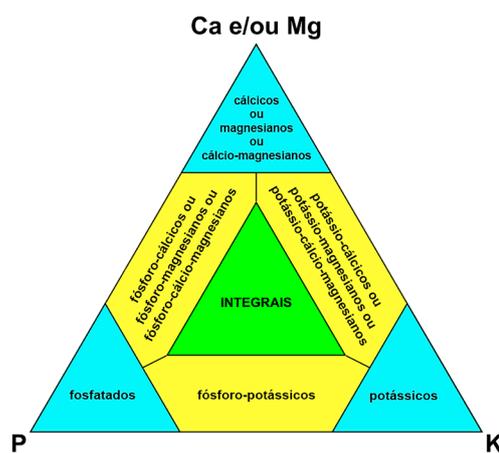


Figura 1. Diagrama ternário PKCa-Mg mostrando o agrupamento dos remineralizadores com base na concentração dos macronutrientes primários (P, K) e secundários (Ca e/ou Mg). O centro do diagrama é representado pelos Remineralizadores Integrais, identificados por concentrações elevadas de macronutrientes primários e secundários.

À época da redação desta proposta de classificação, a legislação brasileira determina, conforme a Instrução Normativa 05/2016 do MAPA, que remineralizadores devem conter ao menos 1% em peso de K_2O e soma de bases (i.e., $CaO+MgO+K_2O$) maior ou igual a 9% em peso. Quando um produto se limita a atender a esses requisitos mínimos, sua aceitação no mercado pode ser baixa ou alta, a depender das condições do momento e da região. Nesse sentido, a presente proposta adota critérios subjetivos e qualitativos, sem determinar valores específicos de teores que especifiquem conteúdos altos, médios ou baixos de determinado nutriente para classificar os remineralizadores de solos.

A classificação divide os remineralizadores em quatro grandes grupos, denominados Primários, Secundários, Integrais e Universais, de acordo com o seu conteúdo de

potássio (K), fósforo (P), cálcio (Ca) e magnésio (Mg). A seguir, será apresentada uma breve descrição desses grupos, destacando o seu significado e exemplos representativos dos sub-grupos específicos (Tabela 2). Alguns dos exemplos mencionados já são tradicionalmente usados como remineralizadores, enquanto outros apresentam características químicas e mineralógicas que permitem o seu aproveitamento em processos industriais.

Primários

Esse grupo de remineralizadores engloba uma grande diversidade de rochas com altos teores de macronutrientes primários (P e/ou K). Dentro dessa categoria, são subdivididos em Fosfatados, para rochas com valores elevados de P; Potássicos, quando ricos exclusivamente em K; Fósforo-Potássicos, englobando remineralizadores ricos em ambos os elementos; e associações contendo P ou K e Ca e/ou Mg (Fósforo-Cálcico, Fósforo-Magnésiano, Fósforo-Cálcio-Magnésiano, Potássio-Cálcico, Potássio-Magnésiano, Potássio-Cálcio-Magnésiano)(Figura 1).

Para o subgrupo Potássico, destacam-se mica xistos de origem sedimentar ou hidrotermal, notadamente os ricos em biotita (biotita xistos) (Figura 2), além de pelitos glauconíticos (verdetes) (Figura 2). Para os Fosfatados,

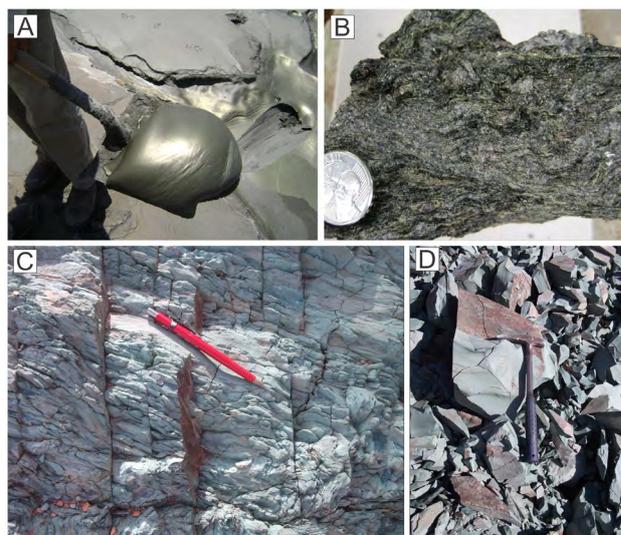


Figura 2. Remineralizador Potássico: (A) Resíduo da Mina de Cu-Au Chapada, em Alto Horizonte-GO, constituído predominantemente por biotita xisto finamente moído; (B) Detalhe de uma amostra de biotita xisto exibindo grande concentração de biotita, além de disseminações de pirita e calcopirita; (C e D) Variedades de verdetes (siltitos e argilitos glauconíticos) pertencentes à Formação Serra da Saudade, do Grupo Bambuí; (C) Afloramento de verdete estratificado exibindo alternância de tonalidades esbranquiçadas e esverdeadas; e (D) fragmentos de verdete maciço com tonalidade cinza esverdeado.

Tabela 2. Classificação dos Remineralizadores, destacando os Grupos e Subgrupos, e indicação de exemplos de remineralizadores em uso ou com potencial de aproveitamento. Notar que os Remineralizadores Universais indicados aqui não aparecem na Figura 2.

CLASSIFICAÇÃO DOS REMINERALIZADORES		
GRUPOS	SUBGRUPOS	EXEMPLOS
PRIMÁRIOS (P, K)	Fosfatados	Sedimentos fosfáticos (fosforitos)
	Potássicos	Biotita-xistos, sedimentos potássicos (verdetes), nefelinitos, ijolitos, nefelina-sienitos e fonolitos
	Fósforo-potássicos	Rochas ultrabásicas alcalinas (kamafugitos, lamproítos, kimberlitos), carbonatitos
	Fósforo-cálcicos	Associação de sedimentos fosfáticos e calcários calcíticos
	Fósforo-magnésianos	Associação de sedimentos fosfáticos e calcários dolomíticos
	Fósforo-cálcio-magnésianos	Associação de sedimentos fosfáticos e calcários dolomíticos, carbonatitos
	Potássio-cálcicos	Rochas calcissilicáticas potássicas
	Potássio-magnésianos	Flogopita-xistos, rochas calcissilicáticas potássicas
	Potássio-cálcio-magnésianos	Rochas calcissilicáticas potássicas
SECUNDÁRIOS (Ca, Mg)	Cálcicos	Calcários calcíticos, rochas calcissilicáticas
	Magnésianos	Calcários dolomíticos, rochas calcissilicáticas
	Cálcio-magnésianos	Rochas ultrabásicas (dunitos, piroxenitos), rochas calcissilicáticas
INTEGRAIS (multielementar - altos teores)	—	Rochas ultrabásicas alcalinas (kamafugitos, lamproítos, kimberlitos), foscorititos, carbonatitos, produtos compostos (ou blends)
UNIVERSAIS (multielementar - baixos teores)	—	Basaltos, andesitos, sienitos

há exemplos de rochas sedimentares fosfáticas (Figura 3), que se encontram frequentemente associadas a fosforitos. Os Fósforo-Potássicos podem ser representados por rochas alcalinas insaturadas enriquecidas em feldspatóides, flogopita e apatita (e.g. lamproítos).

Como mencionado acima, Remineralizadores Primários envolvendo combinações de P ou K e Ca e/ou Mg abrangem um espectro amplo de subgrupos (Figura 1, Tabela 2), em que podemos destacar os Potássio-Magnesianos representados por flogopita xistos oriundos do metassomatismo potássico de rochas ultramáficas e comumente associados aos depósitos de esmeralda e de vermiculita (Figura 4). Os Fósforo-Cálcicos ou Fósforo-Cálcio-Magnesianos podem ser representados por sedimentos fosfáticos associados com calcários ou dolomitos (Figura 3), ou carbonatitos ricos em apatita.

Secundários

Compreendem rochas ricas nos macronutrientes secundários Ca, Mg e, subordinadamente, S. O S, por mais que apresente

ampla ocorrência em uma grande diversidade de ambientes geológicos, com sulfetos e sulfatos, raramente ocorre em concentrações tão elevadas nas rochas quanto Ca e Mg, e, portanto, sua importância na classificação é reduzida e, por isso, não contemplado no Diagrama PKCa-Mg da Figura 1. As subdivisões seguem a mesma lógica da categoria anterior, tendo os remineralizadores Cálcicos, quando ricos em Ca; Magnesianos, quando ricos em Mg; e Cálcio-Magnesianos, para rochas enriquecidas em ambos os elementos.

O subgrupo Cálcico abrange, especialmente, rochas carbonáticas (calcários ou mármore calcítico) e rochas calcissilicáticas. Remineralizadores Magnesianos, por sua vez, compreendem notadamente rochas carbonáticas (dolomitos ou mármore dolomítico) e rochas calcissilicáticas. Para os Cálcio-Magnesianos, há destaque para as rochas calcissilicáticas (Figura 5), variedades metamórficas ou hidrotermais com vasta diversidade mineralógica, e rochas ultramáficas ricas em minerais como olivina e piroxênio, como dunitos e piroxenitos.

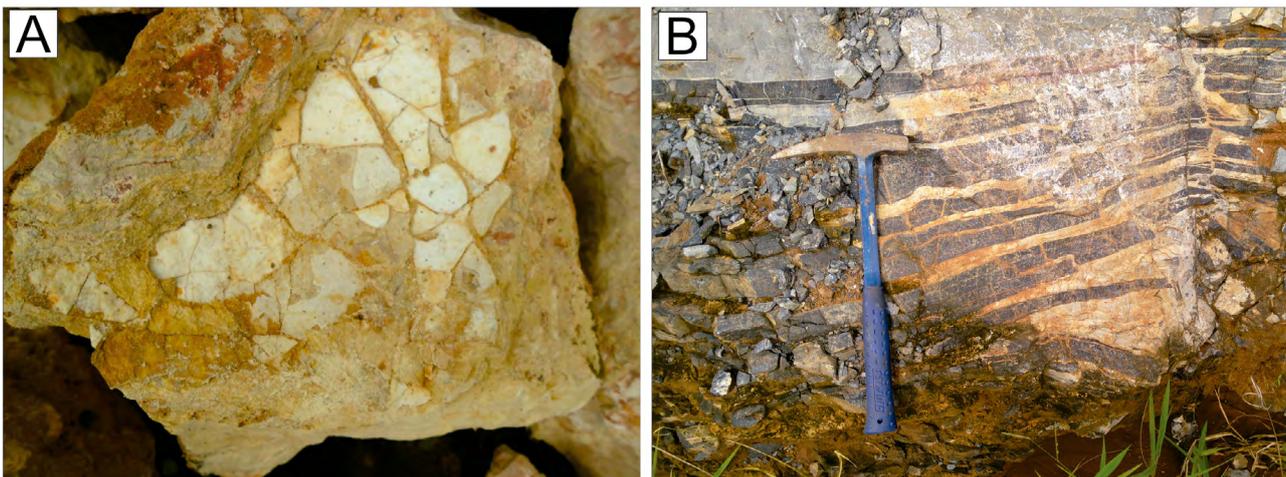


Figura 3. Remineralizadores Fosfático e Fosforo-Cálcio-Magnesiano: (A) siltito fosfático brechado do Grupo Bambuí; (B) intercalação entre estratos de fosforito e dolomito do Grupo Corumbá.



Figura 4. Remineralizador Potássio-Magnesiano: (A e B) Exposições de flogopita xisto na Mina de Vermiculita Bom Jardim de Goiás. A vermiculita é gerada a partir da substituição da flogopita (A), enquanto a flogopita é formada a partir da transformação de rocha ultramáfica em flogopita xisto; (C) Testemunho de sondagem de um flogopita xisto.

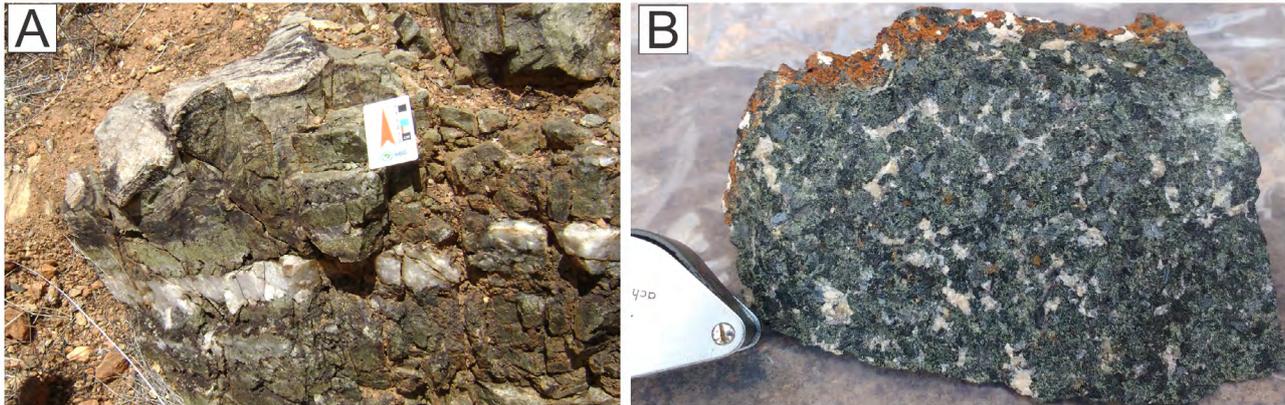


Figura 5. Remineralizador cálcio-magnésiano: (A) Afloramento de diopsídio-calcissilicática (ou diopsídio-skarn) no entorno da Mina de W-Au Bonfim, Lajes-RN; (B) Rocha calcissilicática composta por ampla diversidade de minerais (e.g., hornblenda, diopsídio, epidoto, plagioclásio) ricos em Ca e Mg, município de Lajes-RN.

Integrais

Os Remineralizadores Integrais configuram insumos “multielementares”, podendo fornecer para o solo e plantas todos ou a maioria dos macronutrientes essenciais. Nesta categoria, destacam-se rochas ultramáficas alcalinas, como, por exemplo, kamafugitos, lamproítos e kimberlitos, além de foscoritos e carbonatitos (Figura 6).

Adicionalmente, nesta categoria também são incluídos os *blends* de remineralizadores, em que rochas com características geoquímicas e/ou mineralógicas distintas podem ser misturadas por processos físicos de beneficiamento, alcançando teores satisfatórios de K, P, Ca, Mg e S. O foco desse procedimento pode ser tanto na formulação de remineralizadores integrais, para comercialização como um novo produto com maior valor agregado, ou para entregar insumos personalizados, adequados às necessidades específicas de cada produtor.

Universais

Etimologicamente, a palavra “universal” diz respeito a algo comum, que pertence a um universo. No contexto dessa classificação, o significado é literal: Remineralizadores Universais compreendem rochas que cumprem todos os requisitos (legislativos, geológicos e agrônômicos) para serem consideradas remineralizadores, mas que não possuem teores elevados de macronutrientes primários, mas que eventualmente são ricos em macronutrientes secundários e em um ou mais micronutrientes, como boro (B), cloro (Cl), molibdênio (Mo), cobre (Cu), ferro (Fe), zinco (Zn) e manganês (Mn). Podem constar, nessa categoria, rochas ígneas máficas e intermediárias, como basaltos, andesitos e sienitos (Tabela 2), que tem sido amplamente utilizadas como remineralizadores. Nesse grupo, destacam-se os basaltos amigdaloides com matriz vítrea e amígdalas contendo zeólitas, carbonato, sílica amorfa e valores anômalos em cobre (Figura 7).

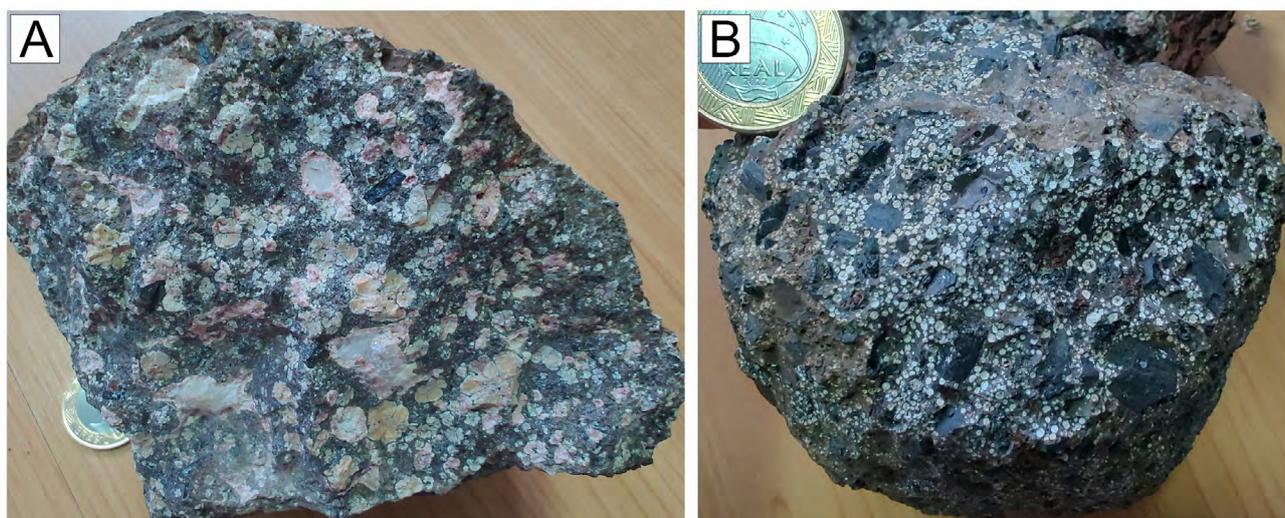


Figura 6. Remineralizador integral (Kamafugito): (A) amostra de kamafugito com grande diversidade mineralógica, com destaque para fenocristais de leucita-analcima e piroxênio (majoritariamente augita) em matriz composta por nefelina, sanidina, flogopita, apatita, calcita, forsterita, e amígdalas preenchidas por carbonato e zeólita; (B) amostra com fenocristais de piroxênio e alta quantidade de amígdalas e vesículas. Fotos de amostras da Província Alcalina de Goiás.

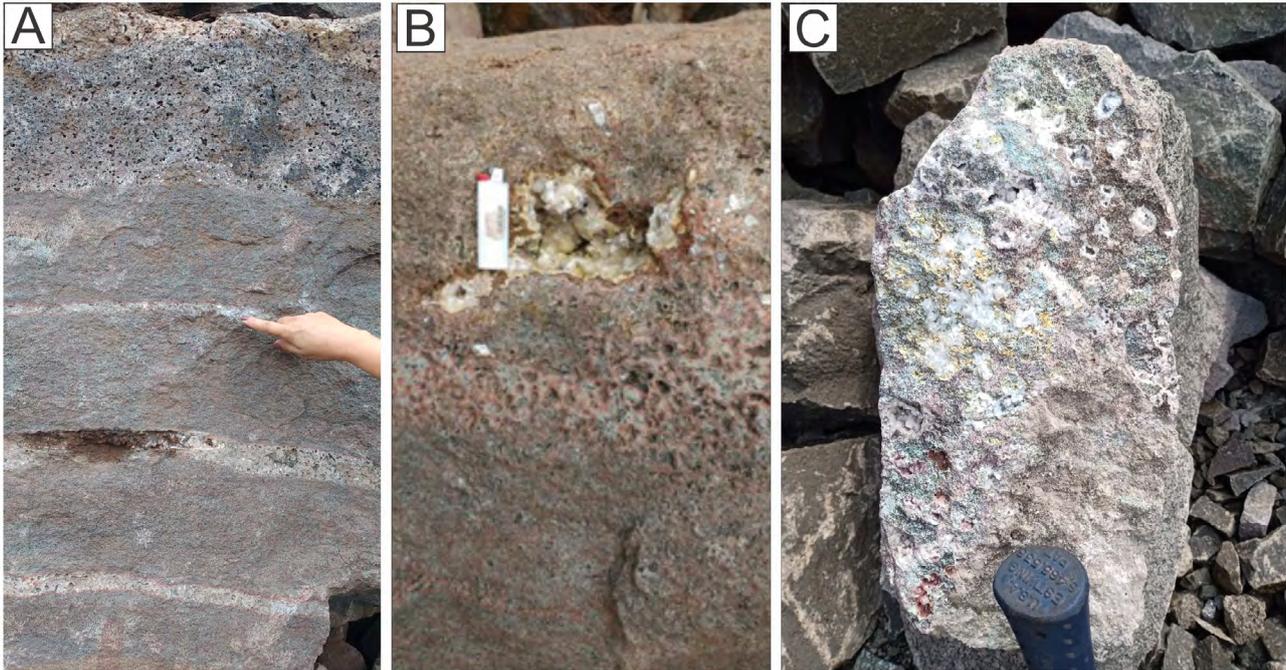


Figura 7. Remineralizador Universal: (A, B e C) Basalto amigdaloidal da Formação Serra Geral, da Bacia do Paraná. Destaque para o grande volume de amígdalas preenchidas com zeólitas, calcita e sílica amorfa. Fotos retiradas em corte da BR-060 e na Pedreira Rio Claro, no entorno de Jataí-GO.

DISCUSSÃO

Mineralogia e solubilidade

Embora o modelo de classificação proposto tenha como base a geoquímica, a mineralogia dos remineralizadores é igualmente fundamental. Por mais que uma seja reflexo da outra, a geoquímica aponta para o conteúdo máximo de determinado nutriente no remineralizador, enquanto a mineralogia aponta para outros fatores, tão ou mais importantes que a geoquímica, como a taxa de disponibilização dos elementos químicos e o aporte de nutrientes ao longo do tempo, ambos reflexo da solubilidade dos diferentes minerais frente ao intemperismo (Yadav e Chakrapani, 2006; Theodoro et al., 2012; Klaes et al., 2022). Há, ainda, propriedades adicionais que podem ser estimadas ou previstas através do estudo da base mineralógica, como potencial de aumento da CTC, mudanças de pH e reações de oxi-redução, entre outros (Martins et al., 2010).

Com base na geoquímica, há um potencial e, de certa forma, uma expectativa por parte do consumidor de que o remineralizador efetivamente disponibilizará integralmente todo o seu conteúdo de determinado nutriente, o que, na prática, quase nunca acontece. Este fenômeno ocorre porque, seja na mineralogia primária (i.e., originária da rocha sem alteração) ou na secundária (i.e., formada por processos geológicos após a formação da rocha, como o intemperismo), há uma parte dos minerais que disponibiliza cátions trocáveis, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , e outra fração que os retém, geralmente devido às características de suas estruturas cristalinas (Teixeira et al., 2007; Lima, 2017). Nesse contexto, a taxa de

disponibilização é tida como a porcentagem de determinado nutriente que é efetivamente disponibilizada para o solo e as culturas, podendo ser medida e quantificada através de testes agrônomicos, com a utilização de ácidos húmicos e fúlvicos do solo, ou em laboratório, através de ataque ácido com substâncias que se aproximem das encontradas em condições naturais, como ácido cítrico ou oxálico (Pittman e Lewan, 1994; Theodoro e Leonardos, 2015).

Além da taxa de disponibilização, a liberação de nutrientes ao longo do tempo também é fortemente afetada pela mineralogia, dado que há minerais com liberação rápida e outros com disponibilização prolongada e/ou tardia, como mostrado em trabalhos que avaliam as mudanças da composição química do solo ao longo do tempo (Ferreira, 2021). Esta propriedade é dependente de diferentes fatores intempéricos a que o remineralizador será submetido, como, temperatura, pluviosidade, umidade e biota do solo, mas também é reflexo direto da solubilidade de cada mineral. De maneira geral, frente ao intemperismo os minerais mais solúveis tendem a ser os sais e carbonatos, seguidos por minerais insaturados em SiO_2 , como, por exemplo, feldspatoides e olivina, além de minerais anidros e com elementos na sua forma reduzida, como Fe^{2+} ; ao passo que os mais estáveis tendem a ser os mais ricos em SiO_2 , Al_2O_3 e Fe^{3+} , além dos hidratados e refratários (Wieland et al., 1988; Tardy e Du-ploy, 1992). Nesse sentido, insumos com maior diversidade mineralógica, com alguns minerais mais reativos e outros mais estáveis, potencialmente proporcionam uma liberação contínua e equilibrada ao longo do tempo.

Há, por fim, outras propriedades relevantes para os remineralizadores atreladas à sua mineralogia. Destacam-se,

entre elas, o aumento de CTC, não exclusivamente, mas tipicamente causado por filossilicatos 2:1, notadamente micas trioctáedricas, como biotita e flogopita; aumento do pH, desencadeado pela alteração dos minerais da paragênese primária do remineralizador; reações de oxidação-redução, causadas não somente por processos inorgânicos, mas também pela microbiota do solo; e aumento da capacidade de sequestro de CO₂ (Van Straaten, 2007; Uroz et al., 2015; Manning, 2021). Cabe, ainda, uma menção às zeólitas, tectossilicatos e outros minerais com estruturas que podem funcionar como filtros naturais de elementos químicos e moléculas, auxiliando na liberação equilibrada de nutrientes ao longo do tempo, aumentando a CTC e a adsorção de elementos, além de poderem atuar como condicionadores de solo (Resende et al., 2009).

Remineralizadores como fontes de micronutrientes

Além dos macronutrientes, há micronutrientes que, embora não componham a base da classificação proposta, devem ser levados em consideração na gestão dos insumos, como boro (B), cloro (Cl), molibdênio (Mo), cobre (Cu), ferro (Fe²⁺), zinco (Zn) e manganês (Mn). Cada um desses elementos possui funções distintas e essenciais para a nutrição e desenvolvimento das culturas agrícolas e, dependendo do produto utilizado, podem ser encontrados em quantidades satisfatórias nos remineralizadores (Van Straaten, 2007).

Como exemplos, podem ser citados rejeitos de mineração adequados à utilização como remineralizadores, podendo conter teores elevados de micronutrientes como Cu, Zn e Mo, entre outros. Em outros casos, materiais geológicos não-tóxicos podem ser empregados em *blends*, contribuindo para o aumento de um ou mais micronutrientes. Portanto, ressalta-se a importância da utilização consciente e estratégica dos remineralizadores, com potencial de reduzir custos e aumentar a produtividade.

CONCLUSÕES

A dinâmica dos remineralizadores, tanto no âmbito científico quanto no comercial, provavelmente sofrerá muitas mudanças nos próximos anos e, conseqüentemente, a presente proposta de classificação possivelmente necessitará ser reavaliada, aprimorada e adaptada. Por mais que a base adotada seja a geoquímica, técnica consagrada e amplamente utilizada há décadas, podem tornar-se necessárias análises complementares ou novos campos de classificação, orientados para grupos de culturas ou novos insumos inseridos no mercado, por exemplo.

Ainda assim, o intuito principal da classificação proposta consiste em padronizar a comunicação entre todas as pessoas envolvidas na área de remineralizadores, seguindo critérios científicos objetivos e de fácil compreensão. Adicionalmente, outra vantagem do esquema de classificação é a de conseguir englobar todos os remineralizadores, sem excluir ou favorecer produtos, e também eliminando ambigüidades.

REFERÊNCIAS

- ABRACAL . (2023). Associação Brasileira dos Produtores de Calcário Agrícola – Relatórios. Disponível em: <https://abracal.com.br/site/estatisticas/>. Acesso em: 25 jun 2024.
- Almeida, J. A., Cunha, G. O. M., Heberle, D. A., Mafra, A. L. (2022). Potential of olivine melilitite as a soil remineralizer according to particle size and rates. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 57, e01445. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921>
- Bell, M. J., Ransom, M. D., Thompson, M. L., Hinsinger, P., Florence, A. M., Moody, P. W., Guppy, C. N. (2021). Considering Soil Potassium Pools with Dissimilar Plant Availability. In: T. S. Murrell et al. (eds.), *Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops*, pp. 163-190. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7_7
- Castro, G. S. A., Crusciol, C. A. C. (2013). Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. *Geoderma*, 195-196, 234-242. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.12.006>
- Chaves, A. P. (2010). Rotas Tecnológicas Convencionais e Alternativas para a Obtenção de Fertilizantes. In: Fernandes, F.R.C., Luz, A.B., Castilhos, Z.C. *Agrominerais para o Brasil*. CETEM, Rio de Janeiro, pp. 45-60. Disponível em: <http://livroaberto.ibict.br/handle/1/920>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- Deer, W. A., Howie, R. A., Zussman, J. (2013). *An Introduction to the Rock Forming Minerals*. 3rd ed. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland. 510 p. <https://doi.org/10.1180/DHZ>
- Ferreira, B. C. (2021). *Kamafugito Proveniente da Região do Alto Paranaíba-MG como Remineralizador de Solo*. Tese (Doutorado). Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 170 p. <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2021.288>
- 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, 11-36. <https://doi.org/10.1023/A:1009859309453>
- Hawthorne, F. C., Oberti, R., Harlow, G. E., Maresch, W. V., Martin, R. F., Schumacher, J. C., Welch, M. D. (2012). Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist*, 97, 2031-2048. <https://doi.org/10.2138/am.2012.4276>
- Ilchenko, V. (1955). Os tufos vulcânicos da Mata da Corda e o seu emprego na Agricultura: Minas Gerais. *Depart. Prod. Vegetal, Boletim Agricultura*, Belo Horizonte, Ano 4 (9-10), 39-71.
- Klaes, B., Wörner, G., Thiele-Bruhn, S., Arz, H. W., Struck, J., Dellwig, O., Groschopf, N., Lorenz, M., Wagner, J., Urrea, O. B., Lamy, F., Kilian, R. (2022). Element mobility related to rock weathering and soil formation at the westward side of the southernmost Patagonian Andes. *Science of the Total Environment*, 817, 152977. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152977>

- Klein, C., Dutrow, B. (2012). *Manual de Ciência dos Minerais*. Porto Alegre: Bookman, 23ª ed., 716 p.
- Lasaga, A. C., Soler, J. M., Ganor, J., Burch, T. E., Nagy, K. L. (1994). Chemical weathering rate laws and global geochemical cycles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(10), 2361-2386. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90016-7)
- Leonardos, O. H., Fyfe, W. S., Kronenberg, B. I. (1976). Rochagem: método de aumento de fertilidade em solos lixiviados a arenosos. XXIX Congresso Brasileiro de Geologia, Anais..., 137-145. Ouro Preto: SBG.
- Leonardos, O. H., Fyfe, W. S., Kronberg, B. I. (1987). The use of ground rocks in laterite systems: An improvement to the use of conventional soluble fertilizers? *Chemical Geology*, 60(1-4), 361-370. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(87\)90143-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(87)90143-4)
- Lepsch, I. F. (2010). *Formação e Conservação dos Solos*. São Paulo: Oficina de Textos, 216 p.
- Lewis, A. L., Sarkar, B., Wade, P., Kemp, S. J., Hodson, M. E., Taylor, L. L. (2021). Effects of mineralogy, chemistry and physical properties of basalts on carbon capture potential and plant-nutrient element release via enhanced weathering. *Applied Geochemistry*, 132, 105023.
- Lima, C. A. A. (2017). *Mineralogia, Geoquímica e Produtos do Intemperismo das Rochas Potássicas e Ultrapotássicas de Santa Cruz das Lages, Região SW da Província Alcalina de Goiás*. Dissertação (Mestrado). Belém: Universidade Federal do Pará, 93 p. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11630>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- Manning, D. A. C. (2021). Rock Dust, Crop Nutrition and Climate Change. IV Congresso Brasileiro de Rochagem, Anais... 90-97. Rio de Janeiro: SGB-CPRM. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/remineralizadores/media/anais_ivcbr_2021.pdf. acesso em: 25 jun. 2024.
- 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. (editores). *Agrominerais para o Brasil*. 5, 89-104. Rio de Janeiro: CETEM/MTC. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/907>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- Martins, V., Silva, D. R. G., Marchi, G., Leite, M. C. A., Martins, E. S., Gonçalves, A. S. F., Guilherme, L. R. G. (2015). Effect of Alternative Multinutrient Sources on Soil Chemical Properties. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 39, <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150587>
- Meena, V. S., Maurya, B. R., Verma, J. P. (2014). Does a Rhizospheric Microorganism Enhance K⁺ Availability in Agricultural Soils? *Microbiological Research*, 169(5-6), 337-347. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.003>
- Mihok, F., Macjo, J., Orinak, A., Orinakova, R., Koval, K., Sisakova, K., Petrus, O., Kostecka, Z. (2020). Controlled nitrogen release fertilizer based on zeolite clinoptilolite: Study of preparation process and release properties using molecular dynamics. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 3, 100030. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2020.100030>
- Molin S. J. D., Nascimento C. O., Teixeira P. C., Benites V. M. (2020). Polyhalite as a potassium and multinutrient source for plant nutrition. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66, 667-678. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1631451>
- Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A. K., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifert, F. A., Zussman, J., Aoki, K., Gottardi, G. (1988). Nomenclature of pyroxenes. *American Mineralogist*, 73, 1123-1133. Disponível em: http://www.minsocam.org/ammin/am73/am73_1123.pdf. Acesso em: 25 jun. 2024.
- Palandri, J. L., Kharaka, Y. K. (2004). *A Compilation of Rate Parameters of Water–Mineral Interaction Kinetics for Application to Geochemical Modeling*. US Geological Survey, Open File Report, 2004-1068. <https://doi.org/10.3133/ofr20041068>
- Pereira, T. T. C., Oliveira, F. S., Freitas, D. F., Damasceno, B. D., Dias, A. C. (2020). A Mineralogia dos Solos Tropicais: Estado da Arte e Relação com o Uso e Manejo. *Geonomos*, 28, 1-14. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v28i1.29650>
- Pittman, E. D., Lewan, M. D. (1994). *Organic Acids in Geological Processes*. Berlin: Springer-Verlag, , 482 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-78356-2>
- Resende, N. G. A. M., Monte, M. B. M., Paiva, P. R. P. (2009). Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, Capítulo 39, 889-915.
- SEAE (Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos). (2022). *Plano Nacional de Fertilizantes 2050: Uma Estratégia para os Fertilizantes no Brasil*. Presidência da República, Brasília, 195 p.
- Savci, S. (2012). Investigation of Effect of Chemical Fertilizers on Environment. *APCBEE Procedia*, 1, 287-292. <https://doi.org/10.1016/j.apcbec.2012.03.047>
- Souza, F. N. S., Oliveira, C. G., Martins, E. S., Alves, J. M. (2017). Efeitos Condicionador e Nutricional de um Remineralizador de Solos Obtido de Resíduos de Mineração. *Agri-Environmental Sciences*, 3(1), 1-14. <https://doi.org/10.36725/agries.v3i1.204>
- Tardy, Y., Duplay, J. (1992). A Method of Estimating the Gibbs Free Energies of Formation of Hydrated and Dehydrated Clay Minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(8), 3007-3029. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)-90287-S](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)-90287-S)

- Teixeira, W., Toledo, M. C.M., Fairchild, T. R., Taioli, F. (2007). *Decifrando a Terra*. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2ª Ed., 624 p.
- Theodoro, S. H. (2000). *A Fertilização da Terra pela Terra: Uma Alternativa para a Sustentabilidade do Pequeno Produtor Rural*. Tese (Doutorado). Brasília: Universidade de Brasília, 225 p. Disponível em: http://icts.unb.br/jspui/bitstream/10482/20881/1/2000_SuziDeCordovaHuffTheodoro.pdf. Acesso em: 25 jun. 2024.
- Theodoro, S. H., Leonardos, O. H. (2011). Rochagem: Uma Questão de Soberania Nacional. XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica, Anais... 1, 337-340. Gramado: SBGq. Disponível em: https://www.sbgq.org.br/_files/ugd/33bad3_23cbbe-99843f4c9baad0d7001a27222f.pdf. Acesso em: 25 jun. 2024.
- Theodoro, S. H., Tchouanjour, J. P., Gonçalves, A. O., Leonardos, O., Harper, J. (2012). A Importância de uma Rede Tecnológica de Rochagem para a Sustentabilidade em Países Tropicais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 5(6), 1390-1407. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v5i6.232929>
- Theodoro, S. H., Leonardos, O. H., Rego, K. G., Medeiros, F. P., Talini, N. L., Santos, F., Oliveira, N. (2013). Efeito do Uso da Técnica de Rochagem Associada à Adubação Orgânica em Solos Tropicais. II Congresso Brasileiro de Rochagem, Anais... 32-42. Poços de Caldas: EMBRAPA. Disponível em: https://remineralize.org/wp-content/uploads/2015/10/CBR_29.pdf. Acesso em: 25 jun. 2024.
- Theodoro, S. H., Leonardos, O. H. (2015). Stonemeal: Principles, Potential, and Perspectives from Brazil. In: Thomas J. Goreau, Ronal W. Larson, and Joanna Campe. (Org.). *Geotherapy: Innovative Methods of Soil Fertility Restoration, Carbon Sequestration, and Reversing CO2 Increase*. 1st ed., pp. 403-418. Florida: CRC Press, <https://doi.org/10.1201/b13788>
- Uroz, S., Kelly, L. C., Turpault, M., Lepleux, C., Frey-Klett, P. (2015). The Mineralosphere Concept: Mineralogical Control of the Distribution and Function of Mineral-associated Bacterial Communities. *Trends in Microbiology*, 23(7), 751-762. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2015.10.004>
- USGS (2023), *Mineral Commodity Summaries 2023*: 214 p., Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2024. <https://doi.org/10.3133/mcs2023>.
- Van Straaten, P. (2007). *Agrogeology: The Use of Rocks for Crops*. Cambridge: Enviroquest, 426 p.
- Wieland, E., Wehrli, B., Stumm, W. (1988). The Coordination Chemistry of Weathering: III. A Generalization on the Dissolution Rates of Minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 1969-1981.
- Yadav, S. K., Chakrapani, G. J. (2006). Dissolution Kinetics of Rock-Water Interactions and Its Implications. *Current Science*, 90(7), 932-937.