Manual da **Rochagem** *e dos* **Remineralizadores**



Suzi Huff Theodoro

Comissão Temática de Recursos Hídricos e Minerais (CTRHM) do Confea

CONFEA Conselho Federal de Engenharia e Agronomia
CREA Conselhos Regionais de Engenharia e Agronomia
mútua Caixa de Assistência dos Profissionais do Crea

Manual da **Rochagem** *e dos* **Remineralizadores**



Suzi Huff Theodoro

Comissão Temática de Recursos Hídricos e Minerais (CTRHM) do Confea

CONFEA Conselho Federal de Engenharia e Agronomia
CREA Conselhos Regionais de Engenharia e Agronomia
mútua Caixa de Assistência dos Profissionais do Crea

COMPOSIÇÃO 2024 DO PLENÁRIO DO CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA – CONFEA

Presidente

Eng. Telecom. Vinicius Marchese Marinelli

Conselheiros e Conselheiras Federais

Eng. Agr. e de Seg. Trab. Álvaro João Bridi – Titular
Eng. Agr. Rosembergue Bragança – Suplente

Eng. Civ. Ana Adalgisa Dias Paulino – Titular
Eng. Civ. e de Seg. Trab. Emerson Cruz Vieira – Suplente

Eng. Mec. e de Seg. Trab. Aysson Rosas Filho – Titular
Eng. Mec. Marcelo Jorge Torres – Suplente

Eng. Agr. Cândido Carnaúba Mota – Titular
Eng. Agr. José Gomes Fragozo Neto – Suplente

Eng. Civ. Carmen Lúcia Petraglia – Titular
Eng. Civ. Paulo Cesar Nayfeld Granja – Suplente

Eng. Eletric. e de Seg. Trab. Célio de Oliveira – Titular
Eng. Eletric. e de Seg. Trab. Flávio de Souza Fernandes – Suplente

Eng. Prod. Daniel Montagnoli Robles – Titular
Geol. Ronaldo Malheiros Figueira – Suplente

Eng. Civ. Domingos Sahib Neto – Titular
Eng. Amb. Vinícius de Oliveira Ribeiro – Suplente

Eng. Eletric. Evânio Ramos Nicoleit – Titular
Eng. Eletric. e de Seg. Trab. André Luiz Grigolo – Suplente

Eng. Agr. Francisco das Chagas da Silva Lira – Titular
Eng. Agr. Alan Michel Gomes Bomfim – Suplente

Eng. Mec. Francisco Lucas Carneiro de Oliveira – Titular
Eng. Mec. e de Seg. Trab. Marcelo José Ribeiro Chaves – Suplente

Eng. Civ. Joel Krüger – Titular
Eng. Civ. Osmar Barros Júnior – Suplente

Eng. Agr. Luiz Antonio Corrêa Lucchesi – Titular
Eng. Agr. José Barbosa Duarte Júnior – Suplente

Eng. Eletric. Marcos da Silva Drago – Titular
Eng. Eletric. Eletrotec. e de Seg. Trab. Lourival Augusto Dias Filho – Suplente

Geol. Mário Cavalcanti de Albuquerque – Titular
Eng. Mec. e de Seg. Trab. Sebastião Weis de Andrade Júnior – Suplente

Eng. Civ. e de Seg. Trab. Neemias Machado Barbosa – Titular
Eng. Sanit. Amb. e de Seg. Trab. Laline Garcia Gomes – Suplente

Eng. Ftal. Nielsen Christianni Gomes da Silva – Titular
Eng. Agr. e de Seg. Trab. Luisa Ramodrigues Peruniz – Suplente

Eng. Eletric. Sérgio Maurício Mendonça Cardoso – Titular
Eng. Eletric. e de Seg. Trab. Alexsandro Meireles Menezes dos Santos – Suplente

COMPOSIÇÃO 2024 DA COMISSÃO DE ARTICULAÇÃO INSTITUCIONAL DO SISTEMA (CAIS) DO CONFEA

Cons. Federal Eng. Agr. Cândido Carnaúba Mota (Coordenador)

Cons. Federal Eng. Eletric. e de Seg. Trab. Célio de Oliveira

Cons. Federal Eng. Agr. Francisco das Chagas da Silva Lira

Cons. Federal Eng. Eletric. Evânio Ramos Nicoleit

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Manual da rochagem e dos remineralizadores / Suzi Huff Theodoro ... [et al.]. -- Brasília, DF : Conselho Federal de Engenharia e Agronomia - Confea, 2026.

Outros autores: Marcos da Silva Drago, Francisco das Chagas da Silva Lira, Ronaldo Malheiros Figueira, Caiubi Emanuel Souza Kuhn, Anderson Assis Nogueira
Bibliografia
ISBN 978-85-61004-02-6

1. Agricultura sustentável 2. Agronomia 3. Geociências 4. Rochagem 5. Rochas 6. Solos - Manejo I. Theodoro, Suzi Huff. II. Drago, Marcos da Silva. III. Lira, Francisco das Chagas da Silva. IV. Figueira, Ronaldo Malheiros. V. Kuhn, Caiubi Emanuel Souza. VI. Nogueira, Anderson Assis.

26-393318.0 CDD-630.275

Índices para catálogo sistemático:

1. Rochagem : Agricultura sustentável 630.275

Maria Alice Ferreira - Bibliotecária - CRB-8/7964

Manual da **Rochagem** *e dos* **Remineralizadores**

AUTORES:

Geol. Suzi Huff Theodoro

COMISSÃO TEMÁTICA DE RECURSOS HÍDRICOS E MINERAIS DO CONFEA – CTRHM 2024

Cons. Federal Eng. Eletric. Marcos da Silva Drago (Coordenador)

Cons. Federal Eng. Agr. Francisco das Chagas da Silva Lira (Coordenador Adjunto)

Geol. Ronaldo Malheiros Figueira (especialista)

Geol. Caiubi Emanuel Souza Kuhn (especialista)

Eng. Amb. e Civ. Anderson Assis Nogueira (especialista)

SUMÁRIO

1. ENTENDA O QUE É A ROCHAGEM 8

INTRODUÇÃO 8

2. A ROCHAGEM 12

2.1 O CONTRAPONTO DE DUAS VISÕES 12

2.2 MAS O QUE SÃO OS REMINERALIZADORES DE SOLO? 14

2.3 TIPOS DE ROCHAS QUE PODEM SER UTILIZADAS PARA REMINERALIZAR SOLOS. 16

3. SOLOS TROPICAIS 23

3.1 EFEITOS DIRETOS: 28

3.2 EFEITOS INDIRETOS 29

3.2.1 INTEMPERISMO ACELERADO DE ROCHAS 29

3.2.2 CONTEÚDO MINERAL E SEGURANÇA NUTRICIONAL 32

3.3 DESAFIOS PARA A AMPLIAÇÃO DO USO DOS REMINERALIZADORES NO BRASIL 35

4. ARCABOUÇO NORMATIVO DOS REMINERALIZADORES 36

4.1 LEI 12.890/2013 36

4.2 INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 05/ 2016 – MAPA 37

5. O REGISTRO DE UM NOVO REMINERALIZADOR 43

6. O PAPEL DO SISTEMA CONFEA/CREA E A FISCALIZAÇÃO DO EXERCÍCIO PROFISSIONAL 48

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS 49

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 50

ANEXO I – LISTA DE PUBLICAÇÕES DE PESQUISADORES BRASILEIROS SOBRE O TEMA DA ROCHAGEM 55

PALAVRA DO PRESIDENTE

A engenharia brasileira tem se consolidado como protagonista na construção de soluções sustentáveis para os desafios do nosso tempo. Entre essas soluções, a rochagem e o uso de remineralizadores se destacam como tecnologias que não apenas recuperam solos degradados, mas também apontam caminhos para uma agricultura mais resiliente, eficiente e comprometida com o equilíbrio ambiental.

Este manual é mais do que um instrumento técnico, é um convite à mudança de paradigma. A ciência, ao dialogar com o saber ancestral e com as necessidades contemporâneas, mostra que é possível produzir com responsabilidade, respeitando os ciclos da natureza e valorizando os recursos minerais de forma consciente. É a engenharia em sua essência: transformar conhecimento em benefício coletivo.

Ao regulamentar e incentivar o uso dos remineralizadores, o Brasil avança em direção a uma agricultura regenerativa, que fortalece a segurança alimentar, reduz a dependência de insumos externos e contribui para o enfrentamento das mudanças climáticas. O Confea se orgulha de apoiar essa pauta, e de seguir ao lado de profissionais, pesquisadores e instituições que fazem da inovação e da sustentabilidade os pilares de sua atuação.

Que este manual seja um marco na disseminação do conhecimento e no fortalecimento de práticas que devolvem ao solo, e ao planeta, sua vitalidade e capacidade de sustentar a vida.

Eng. Telecom. Vinicius Marchese

Presidente do Confea

ENTENDA O QUE É A ROCHAGEM

1. Introdução

As rochas são mães dos solos e filhas do ventre fecundo da terra.

Para alguns, a rochagem é uma tecnologia ou prática agrícola, para outros, uma alternativa de manejo do solo. É provável que seja uma alternativa tecnológica que tem como prática o acréscimo de determinados tipos de rochas moídas ao solo, como forma de manejar a sua fertilidade. O uso desses materiais possibilita a remineralização e o rejuvenescimento do solo, o que resulta no aumento dos níveis de fertilidade (LEONARDOS, et al., 1976). Ela pode ser entendida como um "intemperismo reverso" (THEODORO, 2022). No lugar do desgaste, da perda e da lixiviação, ocorre o acréscimo de vários nutrientes que foram perdidos por processos naturais ou pelo mau uso dos solos (KELLER, 1948).

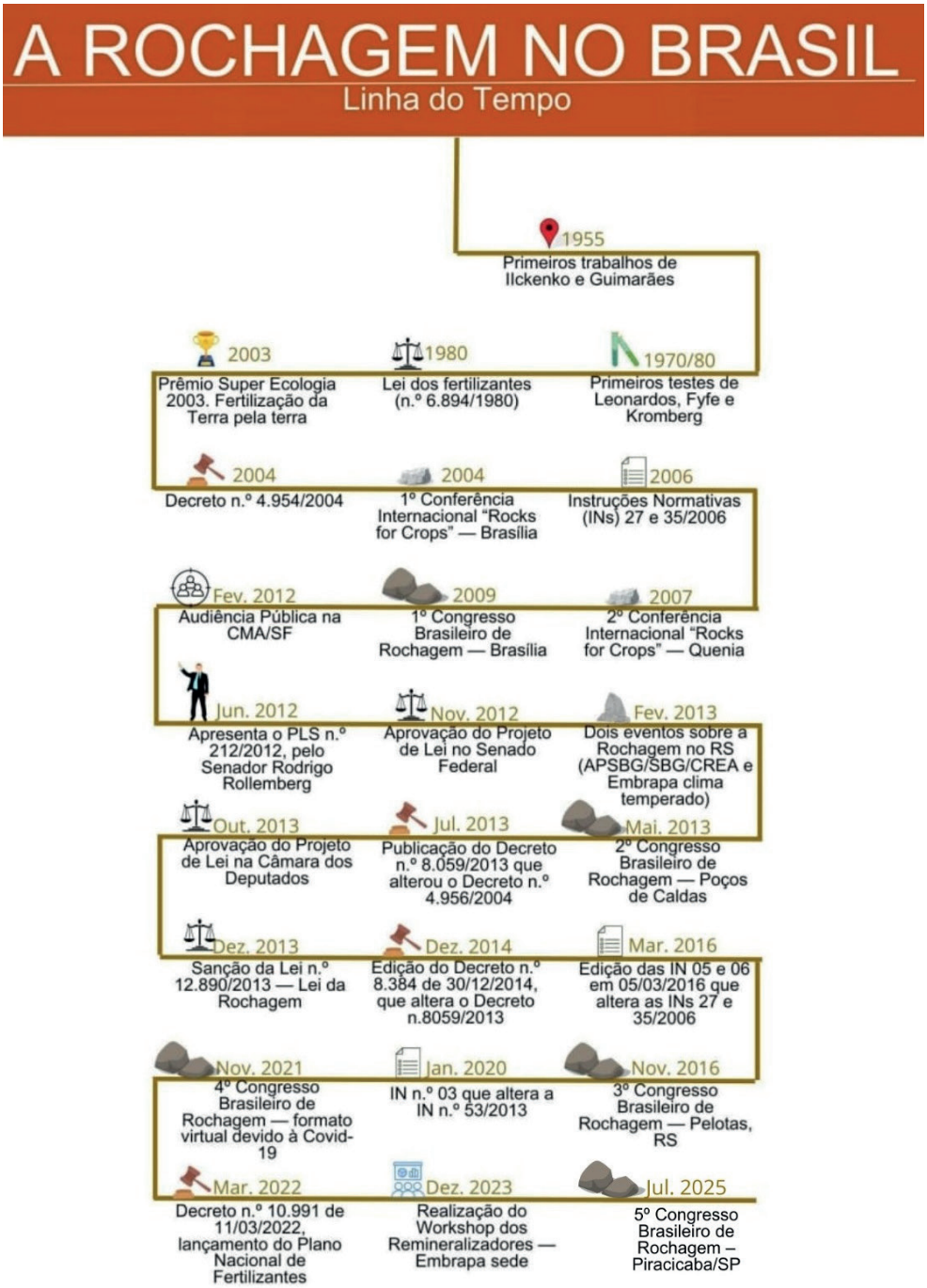
Os princípios da rochagem estão baseados em práticas de povos ancestrais, como os Incas e Egípcios, que manejavam os recursos naturais para preservar a fertilidade de suas terras, mas, também, e especialmente, baseia-se nos princípios da natureza, que mostram que o desgaste e rejuvenescimento são mecanismos permanentes e recorrentes na formação dos solos. Ao longo da história, diversos cientistas, desde o século XVIII, defenderam a eficácia dessa prática, destacando a capacidade das rochas de fornecer uma ampla gama de nutrientes essenciais para as plantas. Destacam-se, aqui, os trabalhos pioneiros de James Hutton em 1780, na Escócia, de Julios Hensel, em 1894, na Alemanha, e de Vernadskii, em 1945, na Rússia. O primeiro já recomendava a rochagem nas terras altas da Escócia. O segundo escreveu *Pães de Pedra* e estabeleceu os primeiros princípios da tecnologia. O terceiro cunhou o termo *Biosfera* e é o precursor da concepção moderna de Gaia como um sistema vivo.

No Brasil, os estudos de Ilchencko e Guimarães (1955), em Minas Gerais, foram pioneiros. Posteriormente, nos anos de 1970 e 1980, Leonardos e colaboradores sugeriram o uso dos pós de rocha silicáticas (por eles chamados de petrofertilizantes) como alternativa para a fertilização dos solos intemperizados das regiões tropicais e estabeleceram a primeira definição do conceito de rochagem. Paralelamente, outros precursores, como Knapik e Barreto, defendiam o preceito de que as rochas silicáticas moídas eram a solução para aumentar a fertilidade dos solos. A partir do final dos anos de 1990 e do início dos anos 2000, essa possibilidade ganhou destaque, particularmente por ser uma tecnologia que atende aos pressupostos do desenvolvimento sustentável estabelecido pelas Nações Unidas como uma condição para a sobrevivência da espécie humana no planeta (THEODORO, 2000).

Desde os anos 2000, uma quantidade crescente de teses, dissertações, artigos

científicos e eventos elevaram a rochagem a um novo patamar de importância e de reconhecimento devido, especialmente, às garantias referentes às questões produtivas, ambientais e econômicas. E foi esse esforço coletivo dos cientistas brasileiros que permitiu a criação do arcabouço legal, quando foi regulamentado o uso dos pós de rocha, denominados *remineralizadores* no Brasil (Figura 01). É importante ressaltar que a rochagem é a tecnologia e o remineralizador é o produto empregado por essa técnica.

Figura 01 – Linha do tempo do processo de desenvolvimento da rochagem no Brasil



Fonte: Viana, M. E. B et al., 2025, Revista Novo Solo.
(https://revistanovosolo.org.br/2025/07/11/avancos-e-inovacoes-da-tecnologia-da-rochagem-no-brasil/)

Deste então, a rochagem tem sido revisitada em função de diversas necessidades contemporâneas, tais como o aumento da produção de alimentos e *commodities*, a diminuição dos custos de produção e a incorporação de práticas agrícolas menos impactantes para o meio ambiente. Além disso, a prática de adição de rochas moídas ao solo é capaz de viabilizar uma série de efeitos diretos, como o aumento do pH e da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) do solo, a redução da toxidez de alumínio e das perdas por evaporação, o que facilita a conservação da umidade do solo. Esse conjunto de benefícios potencializa o desenvolvimento das plantas.

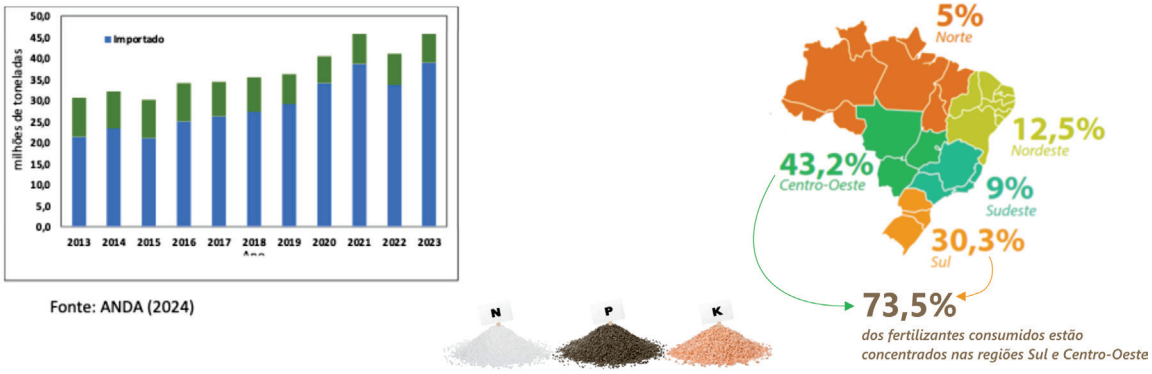
Efeitos indiretos também vêm sendo relatados pelas pesquisas, como o potencial de capturar CO_2, o que transformaria a agricultura em uma prática mais sustentável, porque contribuiria com a redução e a captura de gases de efeito estufa (GEE). Nos últimos anos, os pesquisadores (RENFORT, 2012, MANNING et al., 2018, 2024 e BEERLING et al., 2020) vêm propondo o uso do conceito de Intemperismo Acelerado de Rochas (ERW do termo em Inglês *Enhanced Rock Weathering*), que resultaria de um processo de reações dos minerais com o ácido carbônico no solo durante o processo natural de intemperismo químico.

No entanto, céticos que não vislumbram o uso de remineralizadores como uma alternativa eficiente refutam esses princípios e criticam os resultados positivos. Manning (2013) destaca que alguns experimentos não apresentaram resultados positivos ou foram contraditórios, em função da falta de conhecimento das características originais do solo, dos tipos de nutriente presentes nas rochas utilizados e do estágio de alteração e/ou estado físico (estrutura cristalina) dos componentes mineralógicos. Esse conhecimento prévio é crucial para compreender como se dará o processo de solubilização dos minerais primários ou secundários.

Carvalho (2012) acrescenta que outros motivos se referem à inadequação dos tempos de avaliação dos experimentos ou das metodologias utilizadas. É possível, ainda, mencionar outros equívocos resultantes de testes efetuados por pesquisadores que realizam experimentos baseados em metodologias estabelecidas para fertilizantes sintéticos, de alta solubilidade. Os princípios e as hipóteses são equivocados porque são insumos diferentes. Os solúveis foram processados para disponibilizar rapidamente os nutrientes, as rochas moídas possuem baixa solubilidade, porém com um efeito residual estendido, enquanto os primeiros precisam de reposição com frequência.

O resultado dessa diferença de manejo impacta diretamente nos custos de produção. Somado a imprecisões, é importante ter em conta que existem interesses econômicos gigantescos que, seguidamente, desqualificam outras rotas tecnológicas diferentes daquela que consolidou os fertilizantes solúveis como opção para a agricultura dita moderna. No caso do Brasil, esses interesses se expli cam porque o País figura entre os quatro maiores importadores de fertilizantes químicos do planeta (Figura 02).

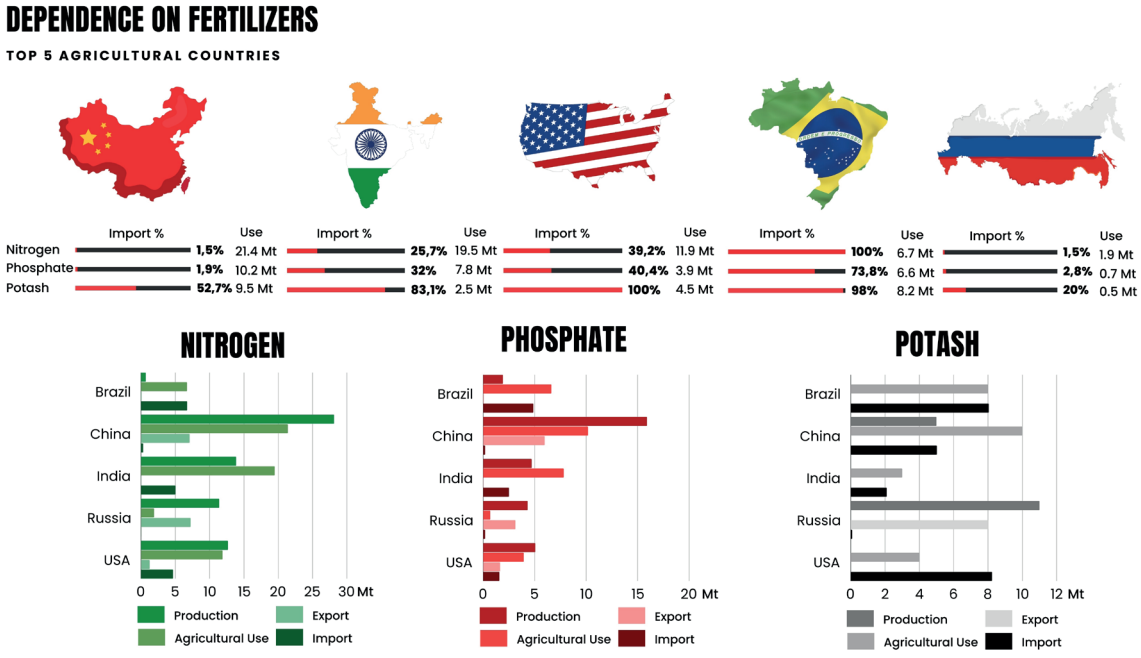
Figura 02 – Produção, Importação e Consumo de fertilizantes no Brasil



Fonte: ANDA (2024)

Segundo a FAOSTAT– Divisão de Estatística da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (2024), o Brasil importa 96% de potássio, 74% de fósforo e quase 100% de nitrogênio. Não somente, ainda importamos enxofre, que compõe parte das formulações fosfatadas. Tão importante quanto esse fato é a posição que o Brasil ocupa, sendo o segundo país a utilizar as maiores cargas desses produtos por hectare, ficando atrás apenas da China (Figura 03).

Figura 03 - Dependência de fertilizantes de alta solubilidade em 2023



Fonte: FAO. 2023. Inputs: Fertilizer by Nutrient. In: FAOSTAT. Rome. [Novembro, 2023].
Elaborado por Gomide et al. (2026) https://doi.org/10.1007/978-3-032-14656-4_11

O uso de remineralizadores (REM) pode mudar essa realidade, porque o Brasil é um país com uma imensa geodiversidade, com vários tipos de rochas aptas para essa finalidade, fartamente distribuídas em todas as regiões, o que resulta no atendimento da demanda de todos os tipos de empreendimentos agrícolas.

2. A Rochagem

A *rochagem* é uma prática ou técnica agrícola que consiste na aplicação de rochas moídas ao solo para melhorar sua fertilidade. Baseia-se no princípio de que as rochas liberam nutrientes de forma gradual, remineralizando e rejuvenescendo os solos e promovendo um crescimento mais completo e saudável das plantas. As rochas podem fornecer uma ampla gama de nutrientes, como potássio, cálcio, magnésio, fósforo e enxofre, elementos benéficos, como a sílica, e mais uma série de micronutrientes (quase a tabela periódica inteira), ou oligoelementos.

Os REM são produtos derivados da moagem (cominuição) de rochas silicáticas que oferecem uma ampla gama de macro e micronutrientes, favorecendo o aumento nos níveis de fertilidade dos solos. Eles melhoram suas características bioquímicas e físicas, assegurando a obtenção de produtividades agrícolas compatíveis com as demandas dos produtores (LEONARDOS et al., 2000, CARVALHO, 2012 MEDEIROS et al., 2025). O conceito se baseia no fato de que os solos mais férteis derivam de determinados tipos de rochas que, por sua natureza genética, possuem um conteúdo químico mais alcalino e até mais diverso. O uso desses materiais está embasado na ideia de que a terra pode fertilizar a própria terra (THEODORO, 2000).

2.1 O Contraponto de duas visões

O desenvolvimento da agricultura nos séculos XIX e XX foi marcado por um conflito entre duas visões sobre a nutrição das plantas. A visão da diversificação nutricional, embora mais antiga e mais alinhada com os processos naturais, foi suplantada pela visão da oferta concentrada de nutrientes específicos, que se mostrou mais lucrativa e mais fácil de controlar. No entanto, a questão da sustentabilidade e da saúde do solo continuou sendo um desafio. Nesse aspecto, o uso de práticas e/ou tecnologias agrícolas tradicionais, como o uso de rochas moídas, pode oferecer alternativas mais sustentáveis para a agricultura.

O conceito de *diversificação nutricional* está alinhado com o entendimento de que a natureza fornece as melhores pistas, mostrando que, apesar de ser admiravelmente heterogênea, os solos perdem, em parte, seus nutrientes pela falta de renovação e/ou acesso às rochas que os originaram. Considerando esse pressuposto, ao se acrescentar rochas moídas ao solo (intemperismo reverso) se torna possível a renovação dos nutrientes perdidos (THEODORO et al., 2022). Nessa perspectiva, a moagem de rochas facilita o aumento da superfície específica dos minerais, permitindo um aumento da dissolução gradual de diversos nutrientes essenciais para as plantas. Uma oferta mais diversificada de nutrientes tende a melhorar a saúde do solo, das plantas e dos alimentos consumidos. O representante mais emblemático desse conceito foi Julius Hensel (Alemanha), que usou a metáfora dos “pães de pedra” para ilustrar a ideia de que a fertilidade do solo poderia ser aumentada como se fosse um pão crescendo a

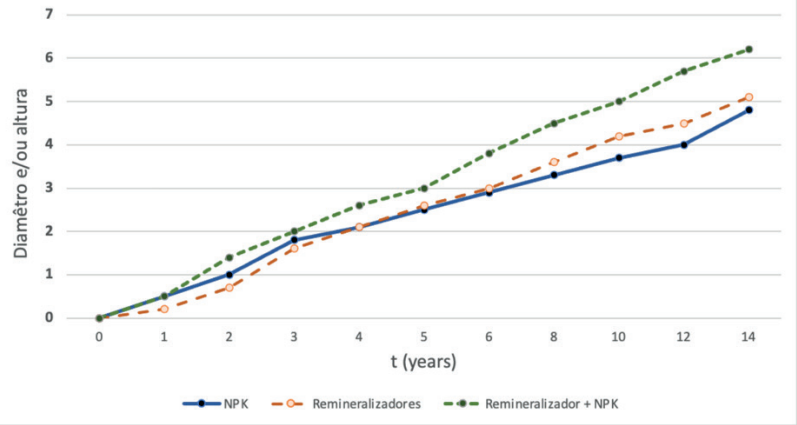
partir do uso de fermentos (rochas moídas), que teria a habilidade de potencializar o aumento das interações dos componentes da massa do pão (solo e água).

A teoria da *concentração de nutrientes específicos* surgiu da necessidade de aumentar a produção agrícola de forma rápida e eficiente. Fundamentou-se na teoria de Justus von Liebig (Alemanha), que propôs que apenas alguns nutrientes específicos eram essenciais para o crescimento das plantas. Nessa visão, a produção de insumos concentrados em alguns nutrientes permitia um controle maior sobre a nutrição das plantas e da produtividade (Lei do Mínimo). Esse pressuposto acabou se tornando dominante, impulsionado por interesses econômicos e pela promessa de acabar com a fome no mundo.

A despeito dessa promessa não cumprida, o modelo evoluiu, transformou-se e se utilizou de novas ferramentas. Porém, o preço dessa opção tem sido cada dia mais alto, seja pela escassez, seja pelo controle da produção em poder de poucos países (MANNING; THEODORO, 2018). A especialização, ou a particularização da oferta nutricional, priva as plantas da necessária diversidade. Nesse modelo de produção, os solos são vistos como substratos passíveis de serem transformados, domesticados e usados à exaustão (PRIMAVESI, 1988). A submissão do solo a propósitos imediatistas deu oportunidade ao desenvolvimento da *agricultura de precisão* (MELGAREJO, 2013), que se distanciou dos processos naturais e selou a quebra da unidade e das conexões entre as rochas e os solos. Ressignificá-los deve fazer parte de uma ação emergencial para garantir o futuro da civilização (CARDOSO et al., 2018), já que o solo representa uma das mais delgadas esferas do planeta (a pedosfera) e tem a grande responsabilidade de sustentar a vida da imensa maioria dos seres vivos (biosfera).

A Figura 04 apresenta um estudo realizado na década de 1990 por Leonardos et al. (2000), no qual foram comparados os efeitos de rochas moídas de fertilizantes solúveis no cultivo de eucaliptos ao longo de 14 anos. Os resultados mostram que, inicialmente, as plantas adubadas com NPK tiveram um crescimento mais acelerado em comparação àquelas que receberam apenas pó de rocha. Contudo, no primeiro ano, o desempenho das plantas submetidas à adubação mista (rocha + NPK) foi semelhante ao do grupo que recebeu apenas fertilizante químico. Segundo os autores, o NPK pode ter atuado como um estímulo inicial para a germinação e o desenvolvimento das plantas (tempo de arranque). Ao longo do tempo, entretanto, observou-se que as plantas adubadas com rochas – tanto isoladamente quanto em combinação com NPK – superaram aquelas que receberam apenas adubação química, apresentando um crescimento contínuo e superior em altura e diâmetro do caule.

Figura 04 - Desenvolvimento de plantas (eucalipto) ao longo do tempo com insumos distintos



FONTE: Modificado de Leonardos et al. (2000).

2.2 Mas o que são os remineralizadores de solo?

Remineralizadores (REM) são produtos derivados de rochas silicáticas moídas que oferecem uma ampla gama de macro e micronutrientes, favorecendo o rejuvenescimento dos solos. Eles melhoram suas características bioquímicas e físicas, assegurando a obtenção de produtividades agrícolas compatíveis com as demandas dos produtores. O conceito se baseia no fato de que os solos mais férteis derivam de determinados tipos de rochas, que, por sua natureza genética, possuem um conteúdo químico mais alcalino e frequentemente mais diversificado. O uso desses materiais se baseia na ideia de que a terra pode fertilizar a própria terra (Theodoro, 2000).

A Lei 12.890/2013 define remineralizador como o *material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho* por processos mecânicos e que altere os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promova a melhoria das propriedades físico-químicas ou da atividade biológica do solo"* (Brasil, 2013).

**Redução e classificação do tamanho* significa que as rochas devem ser apenas moídas (cominuídas) para serem inseridas na categoria de REM. Esse processo de redução do tamanho das partículas aumenta a superfície específica dos grãos e facilita a dissolução dos compostos químicos que compõem o arranjo cristalino dos diferentes minerais.

Com tamanhos menores, esses materiais podem sofrer processos de corrosão ou ataque de diversos tipos de fluídos ácidos (incluindo a água) e por microrganismos presentes no solo. Os compostos químicos liberados nesse processo ocorrem na forma de óxidos de potássio (K_2O), magnésio (MgO), cálcio (CaO), fósforo (P_2O_5), sílica (SiO_2) e uma grande quantidade de micronutrientes como Co, Se, Cr, Pb, Li, Th, Cs, Zr, Br, Ba, F, Sr, Cd, I, V, entre outros. Esse processo permite a liberação (solubilização) lenta de grande parte dos elementos que compõem a tabela periódica ao longo do tempo e do processo de intemperismo.

Considerando a geodiversidade do Brasil e a quantidade de pilhas de produtos gerados pela atividade mineral, pode-se esperar que, em poucos anos, haverá uma espécie de "rebeneficiamento" (separação e moagem) do que antes era considerado como rejeito ou descarte. Para se ter uma ideia deste potencial, a Tabela 01 apresenta um levantamento acerca da quantidade de minerações em atividade no País (em 2020).

Tabela 01 – Porte e formas de lavra das minerações no Brasil

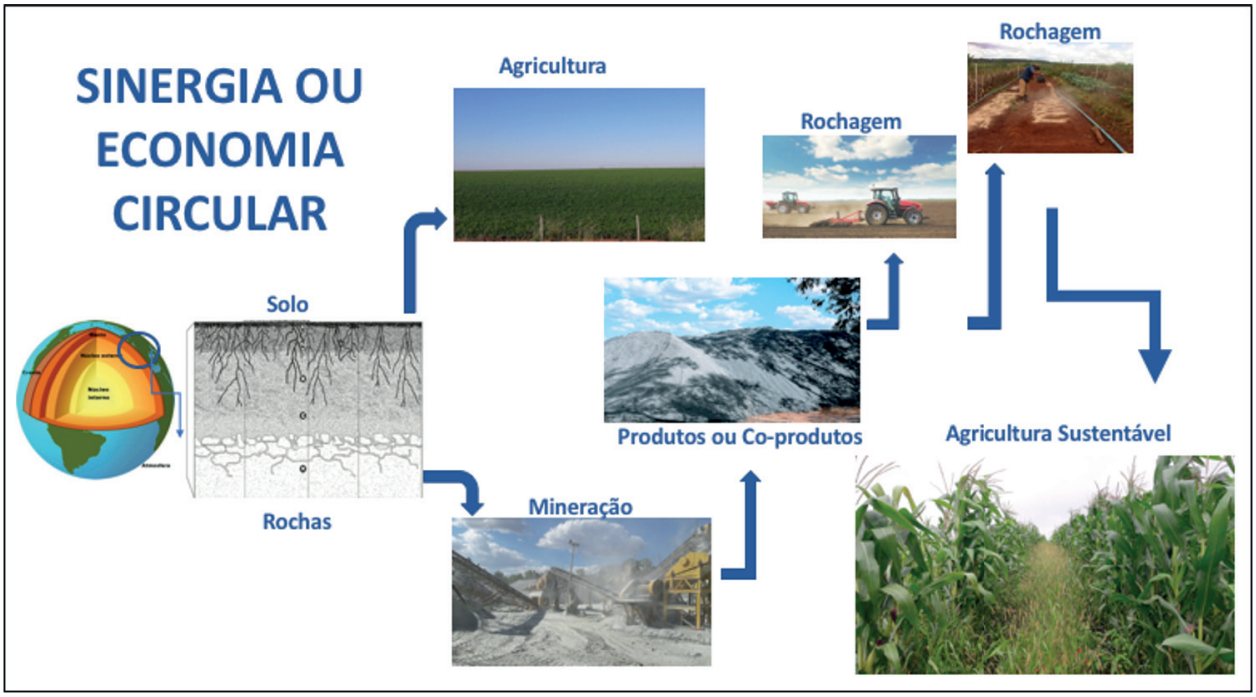
Classe/ Substâncias	Grandes			Médias			Pequenas			Micro			Subtotal			TOTAL
Porte	CA	M	S	CA	M	S	CA	M	S	CA	M	S	CA	M	S	
Brasil	136	0	8	966	1	29	2.727	1	11	5.556	2	47	9.385	4	95	9.484

Legenda: Grande: produção bruta (ROM) anual maior que 1.000.000 t; Média: maior que 100.000 t até 1.000.000 t; Pequena: maior que 10.000 t até 100.000 t; Micro: minas com produção ROM abaixo de 10.000t/ano. CA: mina a céu aberto; M: mina mista (subterrânea e céu aberto); S: mina subterrânea. Não estão sendo consideradas as minas sem produção no período.

Conforme pode ser visto na Tabela 01, de um total de quase 10.000 minerações, cerca de 8.283 se enquadram no porte de micro a pequena mineração. Dessas, cerca de 50% exploram produtos que alimentam o setor de infraestrura de construção civil a partir de rochas que podem converter o descarte, transformando-os em subprodutos como os remineralizadores.

No contexto da economia circular e da busca por soluções sustentáveis para a agricultura, o uso dos materiais descartados da mineração oferece uma solução de "ganho duplo": mitiga o impacto ambiental dos descartes e fornece uma fonte abundante e de baixo custo de insumos agrícolas (Figura 05).

Figura 05 – Economia circular dado pela interação dos setores agrícola e mineral



Fonte: Theodoro (2022).

2.3 Tipos de rochas que podem ser utilizadas para remineralizar solos

Considerando as condicionantes estabelecidas na normativa dos remineralizadores, o conhecimento prévio a respeito da composição mineralógica das rochas e seu grau de alteração, são apresentados a seguir alguns tipos de rochas que podem ser utilizadas para fins de produção dos remineralizadores (dados da cartilha da Rochagem - Theodoro, 2023).

- Anfibolito: Rocha metamórfica* formada principalmente por anfibólios e feldspatos (plagioclásio).
- Basalto: Rocha ígnea** de granulação fina – quando seus cristais não são vistos à vista desarmada – podendo ainda conter grandes quantidades de uma matriz fina, até mesmo vítrea (material amorfo). Essa rocha é constituída principalmente por plagioclásios e piroxênios e, em muitos casos, de olivina. A rocha basáltica geralmente possui cor escura acentuada (rocha máfica).
- Carbonatito: Rocha ígnea ultramáfica constituída essencialmente por carbonatos como calcita e dolomita, além de outros minerais, tais como: magnetita, flogopita, apatita, olivina, piroxênio.
- Filito: Rocha metamórfica de granulação fina constituída basicamente de sericita, clorita, caulinita e quartzo. Tem comumente aspecto sedoso, devido à sericita.
- Folhelho: Rocha sedimentar*** caracterizada por uma granulação fina, com lâminas facilmente separadas. É formada pela consolidação de camadas de lama, argila ou silte.

- Granito: Rocha ígnea plutônica, ácida, granular e de coloração clara, essencialmente constituída por quartzo e feldspatos alcalinos e a acessoriamente por biotita, muscovita, piroxênio e anfibólios.
- Gnaisses: Grupo de rochas metamórficas originadas por metamorfismo regional, especialmente de alto grau, de textura orientada, granular, caracterizada pela presença de minerais como feldspato, além de quartzo, mica, anfibólio.
- Fonolito: Rocha ígnea eruptiva microcristalina – ou seja, que possui minerais muito pequenos – rica em potássio.
- Granodiorito: Rocha ígnea plutônica, ácida, granular, de composição intermediária, constituída por plagioclásio, quartzo e feldspato potássico; contém biotita, hornblenda e, mais raramente, piroxênio.
- Kamafugito: Grupo de rochas ígneas que contém minerais ricos em potássio, cálcio, manganês e fósforo. Normalmente, o grupo é associado à ocorrência de diamantes.
- Pegmatito: Rocha ígnea de granulação grosseira em que o tamanho dos minerais é igual ou maior que 20mm. A maioria dos pegmatitos apresenta mineralogia semelhante ao granito. É composto geralmente por quartzo, feldspato e mica. Pode conter outros minerais, tais como terras raras e gemas (água-marinha, turmalina, topázio, fluorita e apatita, entre outros).
- Piroxenito: Rocha ígnea plutônica composta essencialmente por piroxênios e em menores proporções de olivinas. Acessórios comuns são: magnetita, cromita, espinélio, pirrotita e outros sulfetos.
- Serpentinito: Rocha ígnea ultramáfica composta quase inteiramente por minerais do grupo da serpentina.
- Siltitos (com restrições): Rocha sedimentar rica em minerais potássicos (glauconita, ilita e sercita) e com teores de 5 a 15% de K_2O.
- Xisto: Rocha metamórfica acentuadamente foliada (laminada), composta predominantemente por minerais micáceos orientados – biotita, muscovita, clorita, sericita etc. – e por quartzo, em menor proporção.

* **Rochas Metamórficas**: São rochas que sofreram alterações na sua estrutura em decorrência de altas pressões e temperaturas em subsuperfície. O xistos, gnaisses e quartzitos são exemplos desse tipo de rocha.

** **Rochas Ígneas ou Magmáticas**: São rochas formadas pelo magma solidificado ou expelido por vulcões. Podem ser subdivididas em dois tipos:

1. Rochas magmáticas intrusivas (plutônicas): são as rochas formadas pelo magma que se solidificou em grandes profundidades. O granito é uma das variedades desse tipo de rocha;
2. Rochas magmáticas extrusivas (eruptivas): são as rochas formadas pelo

magma solidificado na superfície. Um exemplo de rocha extrusiva é o Basalto.

***Rochas Sedimentares**: São formadas por meio da sedimentação de partículas de rochas pré-existentes ou de materiais orgânicos. Podem ser divididas em três tipos: clásticas, orgânicas e químicas.

A diversidade de rochas aptas ao uso como remineralizador em vários locais do País mostra que o potencial dessa tecnologia favorece o desenvolvimento local e regional. A Tabela 02 exibe a composição média (em %) das principais rochas aptas para uso como insumos agrícolas, incluindo os remineralizadores, condicionadores e fertilizantes, comparando sua composição média com a crosta terrestre.

Tabela 02 - Composição media (em %) dos principais tipos de rochas aptas para uso como insumos agrícolas

		SiO_2(%)	Al_2O_3(%)	Fe_2O_3(%)	MgO(%)	CaO(%)	K_2O(%)	P_2O_5(%)
Ígneas	Crosta Terrestre	59	15,22	6	3,45	5,1	3,11	0,3
	Basaltos	48	16,05	11,15	6,57	9,87	1,03	
	Carbonatitos	10	3,39	3,46	5,79	36,1	1,36	2,09
	Fonolitos	52	23	3,5	0,5	1,5	8,5	-
	Granitos	66	13	8	1,5	3	4,2	0,12
	Granodioritos	63	17	3,5	1,9	4,5	2	0,2
	Kamafugito	36	6,98	9,92	16	10,5	4,5	2
	Piroxênitos	41,8	13,2	4,8	3,7	6,2	4,5	0,98
Metamórficas	Serpentinitos	45	0,5	11,5	0,2	45	-	-
	Gnaisses	54	14,8	12,13	2,4	6,1	2,5	1,1
	Xistos	45	10,07	4,47	4,46	11,45	1,6	0,3
	Esteatito	47	4,2	8,6	24,3	2,3	-	1,02
	Filitos	65	18,5	1	1	4,8	0,5	0,2
Sedimentares	Evaporitos	-	-	-	35	-	65	-
	Calcários	< 1	< 1	≤ 1		54%	46%	≤ 1
	Folhelhos	40,4	12,5	5,1	1,5	17,7	2,5	0,25
	Siltito glauconítico	60	15,52	6,74	2,95	0,65	7-11,0	0,14

Fonte: a partir de vários autores.

A diversidade mineralógica que compõe as diferentes rochas silicáticas é apresentada na Tabela 03. Essa diversidade não é aleatória; ela reflete diretamente as condições de formação de cada rocha (temperatura, pressão e disponibilidade de elementos químicos durante sua gênese). De um lado, tem-se as rochas félsicas, como os granitos. Elas são caracterizadas pela predominância de minerais “claros” e ricos em sílica, alumínio, sódio e potássio. Os principais componentes são o quartzo, os feldspatos potássicos e os plagioclásios sódicos. Minerais máficos (ricos em ferro e magnésio), como a biotita e o anfibólio, podem estar presentes, mas em menor quantidade. Essas rochas geralmente se formam em temperaturas mais baixas e são típicas da crosta continental.

Já as rochas máficas são mais escuras e densas, tais como os basaltos (vulcânicas) e

os gabros (plutônicas). A composição dessas rochas é dominada por minerais "escuros" e ricos em ferro e em magnésio, com menor teor de sílica. Os minerais mais comuns incluem a olivina, os piroxênios e plagioclásios cálcicos que ocorrem em associação com os minerais ferromagnesianos. Essas rochas se formam em temperaturas mais elevadas e são a base da crosta oceânica, bem como de grandes derrames continentais. Entre esses dois extremos, há uma série de rochas com composições intermediárias (como é o diorito e o andesito) que contêm uma mistura de minerais félsicos e máficos. Além delas, existem as rochas ultramáficas (como o peridotito), que são ainda mais ricas em ferro em magnésio do que as máficas, com pouca ou nenhuma sílica livre (quartzo) e dominadas por olivina e piroxênios.

Tabela 03 - Composição mineralógica de rochas aptas ao uso como insumo agrícola

ROCHAS	MINERALOGIA BÁSICA
Basaltos	Plagioclásio, piroxênio e, secundariamente, olivina.
Carbonatito	Calcita e dolomita e, secundariamente, magnetita, flogopita, apatita, olivina, piroxênios.
Esteatito	Talco, cloritas e, secundariamente, carbonatos (dolomita) e anfibólios.
Fonolito	K-Feldspato (sanidina ou ortoclásio), feldspatóides (nefelina, leucita), piroxênio (aegirina, augita), hornblenda, biotita e raros plagioclásios.
Granitos	Quartzo, K-feldspato e, acessoriamente biotita, muscovita e anfibólios.
Granodiorito	Plagioclásio, quartzo, K-feldspato, biotita, hornblenda e, mais raramente, piroxênio.
Kamafugito	Olivina e flogopita imersos em matriz formada por piroxênios (diopsídio), anfibólios (richterita), feldspatóides (kalsilita), apatita, melilita e zeolitas.
Piroxenito	Piroxênios e, em menor teor, olivina.
Serpentinitos	Minerais do grupo da serpentina.
Gnaisse	Quartzo, K-feldspato (ortoclásio), plagioclásio (andesina), anfibólios, micas e, secundariamente, rutilo e apatita.
Xisto	Biotita, muscovita, clorita, sericita e quartzo em menor proporção.
Filitos	Sericita, clorita, caulinita e quartzo.
Evaporitos	Gipsita, calcita, anidrita, halita, silvinita e carnalita.
Calcários	Calcita, dolomita e aragonita.
Folhelhos	Quartzo e micas.
Verdetes	Quartzo, K- feldspato, albita, micas, glauconita, clorita e opacos.

OBS: Os minerais destacados em vermelho são os mais relevantes para definir o potencial remineralizador de uma rocha.

A diversidade mineralógica de todos esses litotipos é crucial porque afeta não apenas a aparência e a densidade das rochas, mas também as suas propriedades físicas e químicas, tais como sua resistência ao intemperismo, a liberação de nutrientes para o solo e o seu potencial de uso em diversas aplicações, como na construção civil ou como fonte de insumos agrícolas. Entender como ocorre a composição de cada rocha se converte, portanto, em uma chave para prever como os diferentes materiais gerados interagem com o ambiente ao longo do tempo.

Ainda que exista o predomínio de rochas silicáticas na crosta terrestre, algumas das que foram citadas na Tabela 03 não se enquadram na categoria de fontes de

remineralizadores, por não atenderem às condicionantes relativas à soma de bases ($CaO + MgO + K_2O$) ou porque possuem teores de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) acima do permitido pela normativa brasileira. Para compreender a importância do conhecimento acerca da composição mineral das distintas rochas, a Tabela 04 exibe a composição média dos principais minerais que formam as rochas silicáticas.

Tabela 04 - Composição química dos principais minerais formadores de rocha (%).

MINERAL	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P_2O_5
Quartzo – SiO_2	100	-	-	-	-	-	-	-
K-Feldspato – $(K, Na)[AlSi_3O_8]$	62-66	18-20	0-3	0-3	-	9-15	9-4	-
Plagioclásio – $Na[AlSi_3O_8]Ca[Al_2Si_2O_8]$	61-40	19-37	0-20	0-20	-	0-4	6-11	-
Muscovita – $K_2Al_4Si_6Al_2O_{204}$	44-46	34-37	0-4	-	0-3	8-11	0-2	-
Biotita – $K_2(Mg,Fe^{2+})_{6-4}(Fe^{3+},Al,Ti)_{0-2}[Si_{6-5}Al_{2-3}]_{20}(OH,F)_4$	33-36	10-13	3-17	0-2	2-20	6-9	-	-
Anfibólio – $(Mg,Fe^{2+})_7Si_8O_{222}$	38-59	0-19	0-22	0-15	2-26	0-2	1-3	-
Piroxênio – $(Ca,Mg,Fe)Si_2O_6$	45-55	3-10	0-14	16-26	6-20	-	-	-
Olivina – $(Mg,Fe)_2[SiO_4]$	35-40	-	0-30	-	-	27-51	-	-
Apatita – $Ca_5(PO_4)_3(OH,F,Cl)$	-	-	-	52-55	-	-	-	36-42

Fonte: Modificado de van Straaten (2007) e Manning e Theodoro (2018).

Adicionalmente, é preciso ter em mente que quando as rochas afloram na superfície, os seus constituintes minerais encontram um ambiente de desequilíbrio se comparado aos seus ambientes de formação, o que facilita a dissolução dos compostos químicos. No entanto, é igualmente importante compreender que, ainda que uma rocha possua uma mineralogia que indique fontes importantes dos principais macro e micronutrientes, ela pode apresentar restrições devido à velocidade de solubilização dos seus principais constituintes.

A diferença de pressão e de temperatura em um ambiente exposto ao clima, chuvas e diferentes formas de uso da terra favorece reações químicas, que resultam na transformação de minerais primários em outros, mais estáveis nesse novo ambiente. Ao longo desse processo, os componentes mais solúveis das rochas alteradas são levados pela água que escoa pelo perfil do solo sendo conduzidos para os rios, os aquíferos e/ou até os oceanos.

Ao longo do processo evidenciado na Figura 06, esses compostos percolam, infiltram e circulam em meio a diferentes tipos de rochas, potencializando o intemperismo, que pode ser ampliado pela atividade microbiana e pela decomposição da matéria orgânica presente no solo. Esse processo também facilita a concentração de CO_2 e a alteração do pH. Se a degradação da matéria orgânica for parcial, ocorre a produção de ácidos orgânicos que acidificam a água de percolação, potencializando sua ação corrosiva sobre os minerais e intensificando o intemperismo.

Figura 06 - Reações representando os estágios do Intemperismo em rochas silicáticas

1 - Estágio Inicial

Silicatos de K, Na, Mg, Ca +H2O ⟶ ppt ↓ esmectitas + $Si(OH)4 + K^+ + Na^+ + Ca^{++} + OH^-$

$(Al,Mg,Fe)2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ (dissolvido)

2 – Estágio Intermediário

Esmectita +H2O ⟶ ppt. ↓ caolinita + $Si(OH)4 + K^+ + Na^+ + Ca^{++}$ ..... + OH^-

$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (dissolvido)

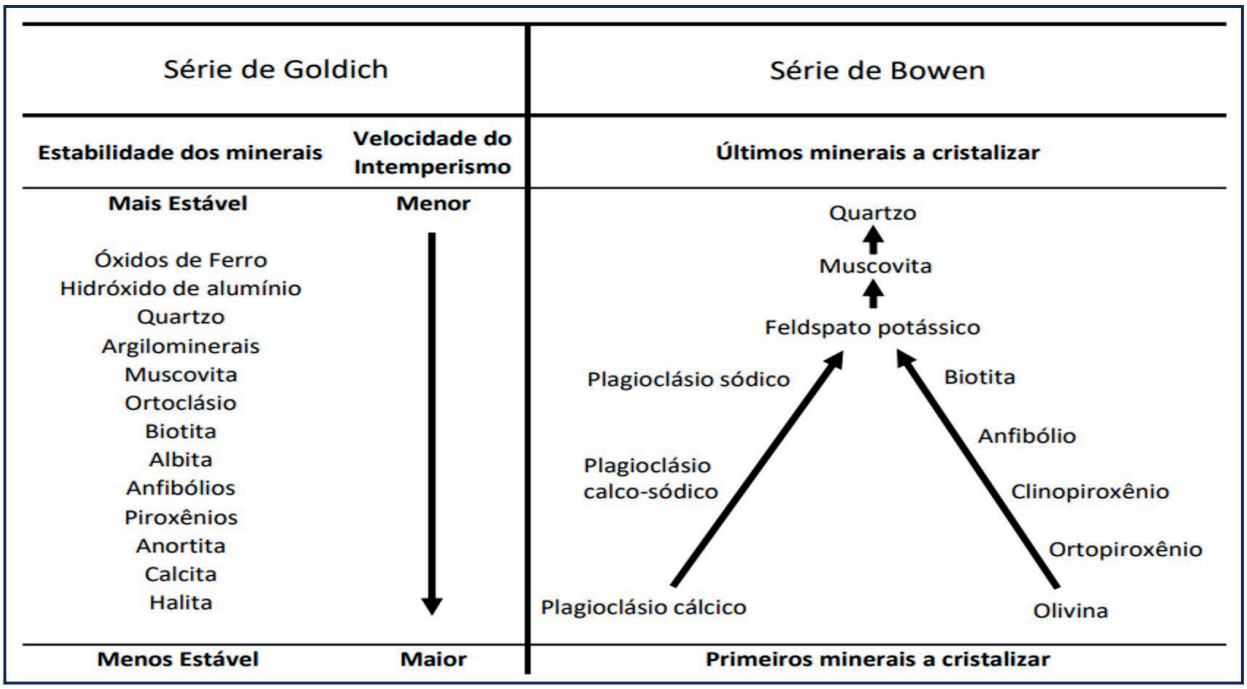
3 – Estágio Final

Caolinita + H_2O ⟶ ppt. ⟶ gibbsita $Al(OH)_3 + Si(OH)_4 + OH^-$

Modificado de Melfi et al. (1999). Baseado em Leonardos et al. (2000) e Theodoro, (2000).
Obs.: ppt (precipitação)

A Figura 07 mostra o processo de transformação dos minerais, onde consta a ordem de susceptibilidade intempérica (Goldich, 1938), que ocorre de maneira inversa à série de cristalização fracionada dos minerais formadores de rochas ígneas (Bowen, 1922). Vale dizer que a cristalização e a organização mineralógica das rochas está na contramão dos processos de intemperismo. A partir desse processo, os solos são formados e transformados por uma série de processos, a depender do uso ou de sua localização.

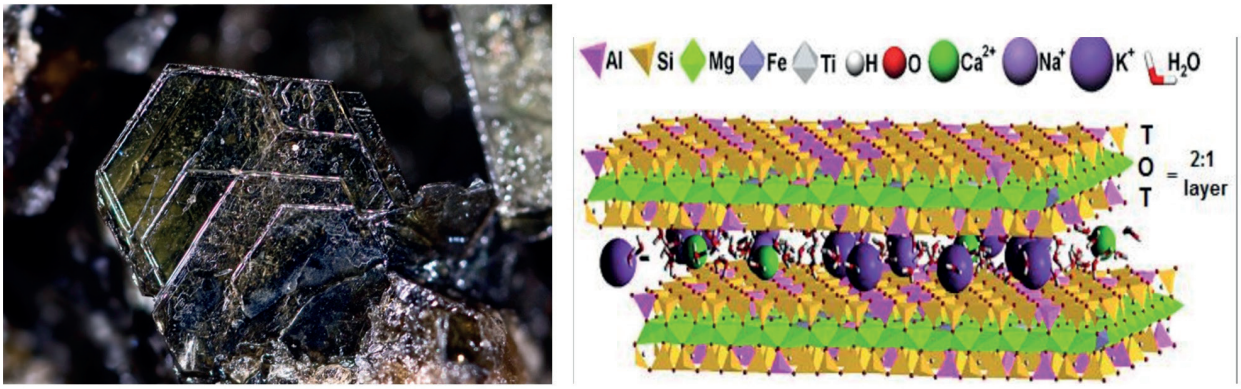
Figura 07 - Série de Goldish e série de Bowen com a preferência de cristalização e de intemperismo dos minerais



Para ilustrar como ocorre o processo de dissolução/solubilização dos minerais a partir de suas estruturas cristalinas e a consequente disponibilização de nutrientes para o solo, pode-se tomar como exemplo o mineral biotita, um filossilicato que ocorre em vários tipos de rochas, e que se encontra em uma posição intermediária no que se refere à estabilidade frente ao processo de intemperismo.

A Figura 08 mostra um cristal de biotita, que é um silicato de ferro e alumínio contendo potássio e, eventualmente, magnésio nas entrecamadas com a seguinte fórmula química: $K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH,F)_2$. De cor preta a castanho escuro, possui hábito cristalino hexagonal na forma de lâminas (pequenas folhas sobrepostas umas as outras). Ao longo do processo de intemperismo, ele pode se transformar em outros minerais, como a vermiculita, que evolui para caolinita nas fases mais avançadas.

Figura 08 - Mineral de biotita. Com o avanço do intemperismo se transforma em vermiculita.



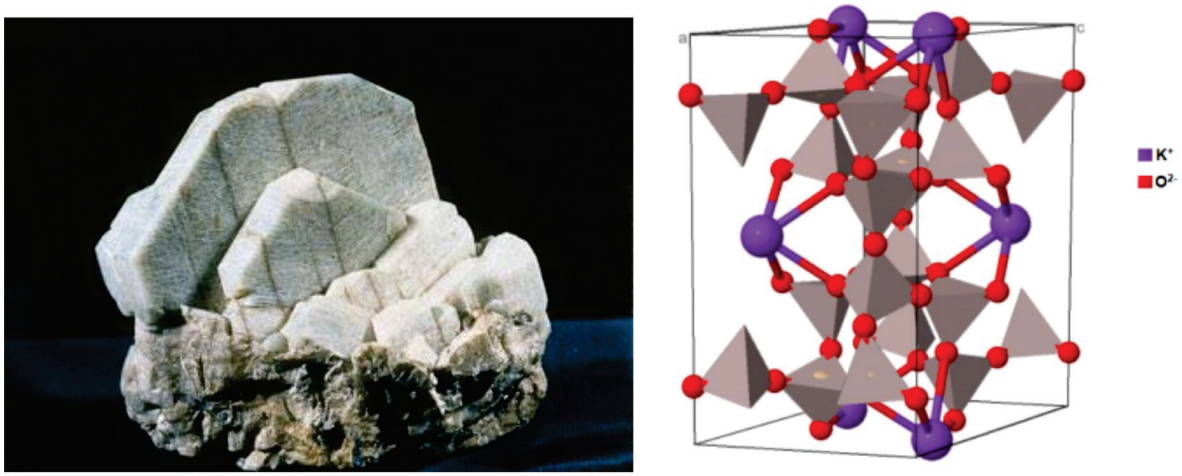
Biotita | Estrutura cristalo-química de Vermiculita

Fonte: Ugarte et al. (2005).

A partir da Figura 08, é possível ver que os cátions magnésio estão ainda firmemente presos na estrutura cristalina. Porém, potássio e sódio estão entre as lâminas e, por isto, têm ligações menos fortes com as placas que formam as diversas lâminas do mineral. Com a continuidade dos processos de intemperismo, os compostos de potássio, cálcio e sódio são solubilizados e disponibilizados para os fluidos que interagem entre as placas, restando basicamente compostos de alumínio, ferro e silicato hidratado.

Por outro lado, em minerais como os feldspatos potássicos (ortoclásio) e calco-sódicos (anortita) a estrutura cristalina consiste no empilhamento de tetraedros de silício em arranjo tridimensional (Figura 09). Quando ocorre substituição de parte do Si^{4+} por Al^{3+}, a carga negativa resultante é neutralizada por cátions K^+, Na^+, Ca^{2+}, originando os diferentes feldspatos. Esses minerais também liberam K e Ca (além de outros íons), mas, devido ao arranjo cristalográfico mais adensado, a dissolução e liberação desses nutrientes é mais complexa e, em geral, mais lenta.

Figura 09 - Estrutura cristalina do mineral feldspato potássico



Feldspato alcalino **Estrutura cristalina de um feldspato**

Fonte: Tomaz (2020).

Esses exemplos mostram que, embora a biotita e o feldspato alcalino sejam silicatos com bastante potássio, a forma como eles liberam esse nutriente para o solo (e, consequentemente, para as plantas) é bem diferente. Na biotita, o potássio fica entre as camadas do mineral, com ligações mais fracas. Isso a torna mais vulnerável ao intemperismo, liberando o nutriente de forma mais rápida. Já no feldspato alcalino, o potássio está fortemente preso na estrutura cristalina, exigindo um processo de intemperismo mais intenso e demorado. Por isso, o feldspato age como um reservatório de longo prazo, liberando potássio de forma lenta e gradual.

3. Solos tropicais e os Remineralizadores

Ao compreender que a formação dos solos é um processo lento que leva de centenas até milhares de anos para formar cada centímetro, pode-se antever porque eles podem ser tão diferentes, às vezes dentro de um mesmo ecossistema, já que são formados por uma grande variedade de rochas, submetidas a condições climáticas distintas e, muitas vezes, intensas, o que potencializa os processos de intemperismo e, consequentemente, a lixiviação dos nutrientes primários.

Em regiões tropicais, a combinação do clima, água abundante e matéria orgânica facilita a aceleração do processo de formação de solos, tornando-os frequentemente lixiviados e com predomínio de minerais secundários e lateríticos, ricos em óxidos de ferro, alumínio e manganês. Por tais motivos, possuem menores níveis de fertilidade natural e grande heterogeneidade em sua morfologia e em suas propriedades físico-hídricas.

Por outro lado, são profundos, bem granulados, com boa porosidade e capacidade de retenção de água, o que favorece o enraizamento das plantas, que são adaptadas a essas condições, explorando grandes volumes de solo em busca de nutrientes. Primavesi (2002) sugere que o perfil mais profundo e a bioestruturação (agregados) dos solos tropicais compensa a sua carência nutricional. Para ela, as raízes das plantas exploram um volume maior de solos novos, em busca de nutrientes e de água, expandindo-se livremente. E melhor enraizamento, quase sempre, significa plantas melhor nutridas e mais exuberantes.

Apesar dessas limitações, os solos tropicais possuem atributos únicos que os tornam adequados para a agricultura, desde que sejam manejados de forma correta, considerando a importância da sua biodiversidade e da necessidade de práticas conservacionistas.

Um dos grandes desafios do uso dos remineralizadores está relacionado à ampliação da oferta de macronutrientes primários, em especial potássio (K) e fósforo (P). Ainda que exista uma expressiva quantidade e variedade de rochas que se apresentam como possíveis fontes desses nutrientes, a dinâmica de liberação dos compostos de K e P para favorecer ou retardar essas reações ainda precisa ser melhor entendida. Muitos estudos (WEERASURIYA et al, 1996; BARD, 2006; MANNING, 2010; MBISSIK, et al., 2021; SANTOS, et al., 2021, SWOBODA et al., 2022) têm mostrado resultados expressivos de liberação do potássio, a partir de minerais como leucita, biotita, muscovita e K-feldspatos.

Pesquisas de Setiawati e Mutmainnah (2016) destacam que a associação dos minerais portadores de potássio com distintas cepas de microrganismos é capaz de solubilizar parte do potássio em poucos dias, especialmente se os minerais apresentarem algum grau de alteração ou “defeitos” em suas redes cristalinas. Mencionam, também, que a solubilização do K pode variar de acordo com a natureza e a composição dos minerais, a sua estrutura cristalina, o grau de alteração e a gênese, mas que a presença de ácidos orgânicos, secretados pelas raízes das plantas e pelos microrganismos, favorece o aumento da solubilidade do potássio. Resultados semelhantes foram obtidos em outras pesquisas (YANG, et al., 2020; SOUZA, et al., 2019; CARVALHO, 2012; BADR, 2006).

Outro aspecto importante se refere ao efeito residual promovido por alguns tipos de rochas, em especial, quando misturadas com materiais orgânicos. Tavares et al. (2018) mostraram que o uso de rocha potássica (fonolito) associado com composto orgânico (maturado ou não) foi capaz de reduzir as perdas dos cátions de K pelo processo de lixiviação, além de permitir sua liberação de forma mais lenta. Os autores destacam que essa habilidade pode ter sido ampliada devido ao aumento da capacidade de troca catiônica (CTC), após a aplicação da mistura organomineral, que permitiu a ampliação dos mecanismos de exsudação de ácidos orgânicos.

No que se refere ao fósforo (P), Hinsinger (2001) menciona que esse nutriente é, pro-

vavelmente, o menos móvel e disponível para plantas, na maioria dos solos, o que se converte em um fator importante, ou mesmo, o principal limitante para o crescimento das plantas. A sua forma disponível para as plantas ocorre na solução do solo, como ânions ortofosfato, predominantemente $H_2PO_4^-$ e HPO_4^{2-}, que podem ser fortemente adsorvidos ao solo ou participar de reações de precipitação.

Hinsinger e Gilkes (1997) estudaram a dissolução da rocha fosfática na presença e ausência de plantas cultivadas em um substrato que simula um solo ácido fixador de fósforo (sem fonte de P e Ca). Eles concluíram que, na ausência de plantas, o baixo pH do substrato resultou na dissolução de cerca de 8 e 30% da rocha fosfática, a depender da dosagem aplicada ao substrato. Contudo, os autores destacam que, na presença de plantas (azevém e colza), a dissolução foi maior na zona das raízes. Esse efeito resultou em uma diminuição significativa no conteúdo de Ca^{+2} total e um acúmulo, concomitante, de P dissolvido na rizosfera.

Os autores sugerem que a redução na oferta de cálcio pode ter promovido a dissolução da rocha fosfática e concluíram que um solo ácido, com a presença de plantas, pode mobilizar o P, em especial na rizosfera, quando combinado com cálcio. O aumento do pH resultou na liberação do fósforo retido nas bordas (ou entre camadas) da estrutura cristalina das argilas 1:1 (THEODORO et al., 2015). Essa dinâmica é especialmente importante para os solos tropicais, em que o fósforo pode estar retido (imóvel) na estrutura de argilas cauliníticas, conforme mostrado por Santos et al. (2021).

Porém, deve-se ter em conta que o uso de P solúvel pode representar uma série de riscos ambientais e à saúde, conforme advertiu Fyfe (1989). Esse autor lembra que a fonte solúvel de fósforo deriva, essencialmente, de rochas formadas em ambiente marinho, que possuem a habilidade de sequestrar grandes concentrações de elementos, como cádmio, urânio e chumbo. Nesse aspecto, o uso de fertilizantes fosfatados pode levar a um acúmulo excessivo de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs), como o cádmio. Essa deve ser uma preocupação em regiões de agricultura intensiva.

Diretamente relacionado às fontes de fósforo, outro ponto importante diz respeito à necessária presença de silício (Si) no solo, para o pleno desenvolvimento de grande parte das plantas (em especial, trigo, arroz e cana-de-açúcar). É importante mencionar que fontes desse nutriente estão disponíveis na quase totalidade dos minerais formadores das rochas silicáticas. Embora o modelo convencional considere o Si como um elemento não essencial (mas benéfico) para as plantas, Kelland et al. (2020) advertem que grande parte das culturas, em especial os cereais, acumulam esse nutriente na parte aérea, trazendo benefícios para o rendimento e para a resistência ao estresse abiótico (seca, salinidade e calor) e biótico (pragas). Esses autores lembram que, quando os resíduos da colheita não são devolvidos ao solo, ocorre o esgotamento das reservas de Si para as futuras culturas implantadas. Além disso, o silício pode deslocar os sítios

de troca ocupados pelo fósforo presente no solo, mas indisponível para as plantas.

Para além de P, K, Si, o cálcio (Ca), o magnésio (Mg) e o enxofre (S), vários micronutrientes são essenciais para o pleno desenvolvimento das plantas e suas relações de trocas entre as raízes e o solo. E, apesar de tais potencialidades, deve ser compreendido que a utilização dos remineralizadores em solos tropicais não deve ser vista simplesmente como uma fonte de nutrientes, que será rapidamente absorvida pelas plantas cultivadas ou, ainda, como forma de acelerar os processos de sucessão e dinamização biológica nos solos (ALMEIDA et al., 2007). Portanto, não se trata de um sistema de substituição de insumos (adubos químicos por pós de rocha) ou de redução de custos (LEFEBVRE, et al., 2019), mas de uma mudança de concepção sobre o manejo da fertilidade dos agroecossistemas.

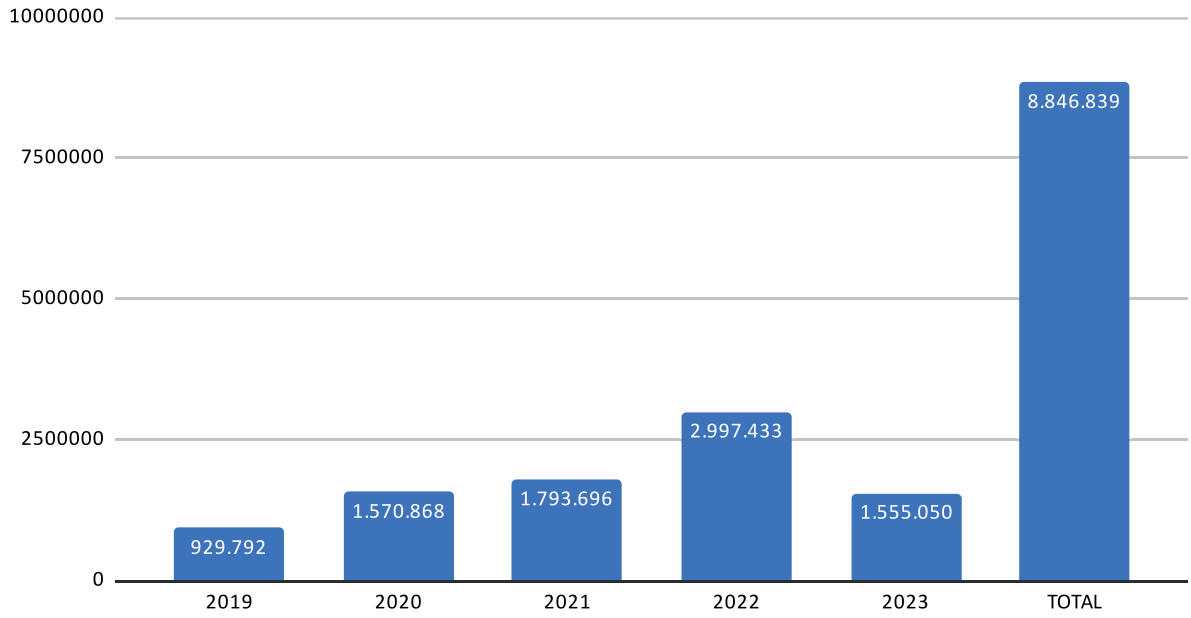
Considerando esses pressupostos e reconhecendo que os remineralizadores representam uma nova abordagem no manejo da fertilidade do solo, destacam-se, a seguir, alguns efeitos decorrentes do seu uso que foram elencados por vários autores, entre os quais Theodoro e Leonardos (2015), Ramos et al. (2022), Martins et al. (2023), e Hardoim et al. (2023).

Para além disso, estudos sistemáticos da Associação Brasileira de Remineralizadores e Fertilizantes Naturais (ABREFEN)[1] vem mostrando que o uso dos REM tem crescido sistematicamente no Brasil. No último levantamento, Martins et al. (2024), mostram uma síntese acerca da produção brasileira de remineralizadores e fertilizantes minerais simples de composição silicática: 2019 a 2023. Segundo os autores, os estados brasileiros que mais produziram REM e fertilizantes Silicáticos (FSi) são Minas Gerais (43%) e Goiás (24%), seguidos por São Paulo (10%), Paraná (9%) e Rio Grande do Sul (6%). Segundo esses dados, ao longo de cinco anos (2019 – 2023) foram consumidas 8.846.839 toneladas (Figura 10).

Apesar de ser uma produção considerável, ainda há muito o que avançar. Porém, considerando a geodiversidade e a quantidade de minerações localizadas em todas as partes do País, muitas delas com a geração de descartes de subprodutos que podem se converter em novos remineralizadores atendendo a demanda de todas as regiões e para os mais distintos tipos de estabelecimentos agropecuários. Os custos por tonelada dos remineralizadores variam entre as diferentes empresas e regiões. No último levantamento feito por Martins et al. (2023), os valores variaram entre R$ 110,00 a R$ 450,00, a depender do tipo de rocha geradora e do processo de beneficiamento. Quanto mais finamente granulado, maiores são os custos.

1 https://abrefen.org.br/2024/11/08/artigos-producao-brasileira-de-remineralizadores-e-fertilizantes-naturais-2019-a-2023/

Figura 10 - Consumo anual de remineralizadores



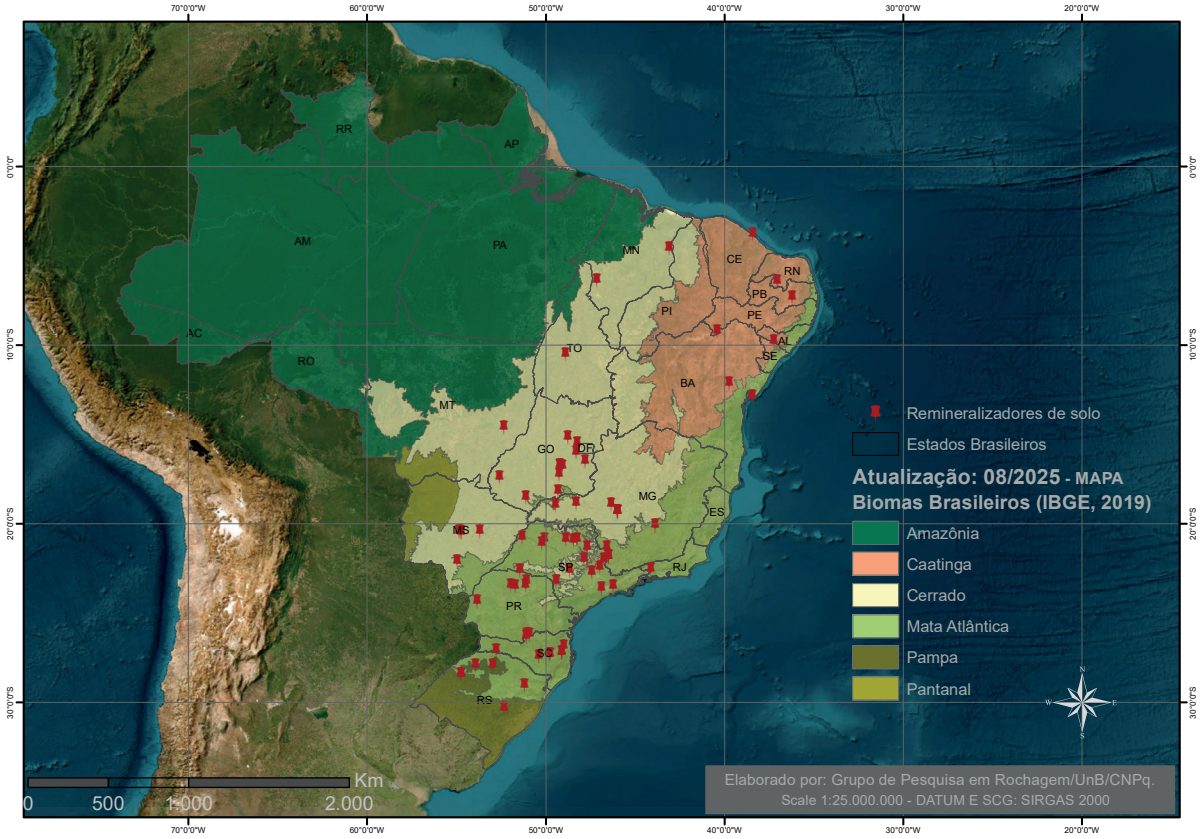
Fonte: a partir dos dados de Martins et al (2024).

Apesar de ser uma produção considerável, ainda há muito o que avançar. Entretanto, considerando a geodiversidade e a quantidade de minerações localizadas em todas as partes do País – muitas delas com a geração de descartes e subprodutos que podem se converter em novos remineralizadores – pode-se presumir que existem fontes aptas para atender à demanda de todas as regiões e para os mais distintos tipos de estabelecimentos agropecuários. Deve-se ter em mente ainda que a distância entre a área de produção e de consumo dos remineralizadores não deve exceder a 500 km, em função dos custos de transporte (THEODORO et al., 2022).

O estudo mostrou que, nos últimos quatro anos, cerca de 10% da área agrícola do País já utiliza os remineralizadores nos seus processos produtivos. Dados do SIPEAGRO[2], do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) mostram que, em 2024, já são 78 produtos registrados até junho de 2025 (Figura 11).

2 https://indicadores.agricultura.gov.br/fertilizantes/index.htm

Figura 11 – Mapa de localização dos remineralizadores (até julho/2025)



Fonte: Modificado de Oliveira et al. (2024). Elaborado e atualizado por Viviane S. de Oliveira.

O processo de adesão a uma nova tecnologia é lento, porque mudar paradigmas não é uma tarefa fácil. Entretanto, os resultados obtidos pelos(as) agricultores(as) de diferentes portes (empresariais e familiares) e em distintos agroecossistemas têm facilitado uma rápida expansão do uso dos remineralizadores, conforme pode ser visto a seguir:

3.1 Efeitos Diretos:

- **Melhora da fertilidade do solo:** aumento dos teores de macro e micronutrientes no solo;
- **Rejuvenescimento e remineralização do solo;**
- **Aumento do pH e da Capacidade de Troca Catiônica (CTC)** do solo;
- **Redução** da toxidez de alumínio, o que no caso de solos tropicais é uma ação fundamental para viabilizar a produção agrícola;
- **Diversificação da oferta de nutrientes (Multinutrientes)** amplia a ciclagem de nutrientes;
- **Aumento** da quantidade e do tamanho das raízes;
- **Redução** das perdas por evaporação, já que favorecem o aumento da capacidade de retenção de água e conservam a umidade do solo;

- **A associação com fontes orgânicas** (estercos, bioinsumos etc.) aceleram o processo de disponibilização de nutrientes;
- **Sustentabilidade:** O uso de rochas moídas é considerada uma prática mais sustentável, pois utiliza recursos naturais a partir de um processo de beneficiamento simples que pode reduzir a dependência da importação de fertilizantes químicos (formulações NPK), o que, no caso do Brasil, tem se convertido em uma das maiores limitações ao acesso a insumos;
- **Preços** são consideravelmente inferiores aos insumos solúveis (entre 20 e 70% mais baratos).

3.2 Efeitos Indiretos:

- **Captura de CO_2** atmosférico, o que contribui para a redução do problema de aquecimento global;
- **Redução dos processos de erosão do solo** potencializam o uso das áreas improdutivas;
- Fortalecimento da **segurança alimentar e, especialmente, nutricional** dos alimentos;
- **Redução da contaminação dos recursos hídricos**;
- **Efeito residual** - são insumos de liberação gradual de nutrientes, que permanecem no solo por longos períodos de tempo.

3.2.1 Intemperismo acelerado de rochas

Entre os principais efeitos indiretos, uma série de estudos tem apontado o imenso potencial dos REM para capturar e armazenar CO_2 no solo. Esse processo tem sido denominado de Intemperismo Acelerado de Rochas (*Enhanced rock Weathering* - ERW) por Renforth et al. (2012, 2019), Beerling et al. (2020, 2024), Manning et al. (2018 e 2022), Guo et al. (2023), Kantola et al. (2023). O potencial pode ser tão significativo que, segundo Lefebvre et al. (2019), se os 12 milhões de hectares agricultáveis no estado de São Paulo aplicassem 1 t ha^{-1} de pó de basalto, poderiam ser capturados entre 1,3 a 2,4 Mt de CO_2 pelo processo de carbonatação de aceleração do processo de intemperismo da rocha.

O ERW pode ser entendido como um processo geoquímico que acelera a decomposição natural de rochas silicáticas para sequestrar dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera. Esse processo é considerado uma estratégia de remoção de carbono (do termo em Inglês *Carbon Dioxide Removal* - CDR) e pode contribuir para mitigar as mudanças climáticas. Para viabilizar esse processo, deve-se acrescentar rochas silicáticas moídas ao solo, tais como basalto, que tendem a reagir facilmente com o CO_2 capturado pelas plantas (pela fotossíntese) e com o carbono disponível na matéria orgânica do

solo. As rochas aplicadas aos solos devem estar granuladas em partículas finas, como forma de promover o aumento da superfície de contato com os fluidos do solo. Em contato com água (H_2O) e CO_2 atmosférico, ocorrem reações químicas que dissolvem os minerais, como é o caso da olivina, por exemplo:

$$\text{(Olivina) } Mg_2SiO_4 + 4CO_{2+} 4H_2O \rightarrow 2Mg_2{}^{++} + 4HCO_{3-} + H_4SiO_4$$

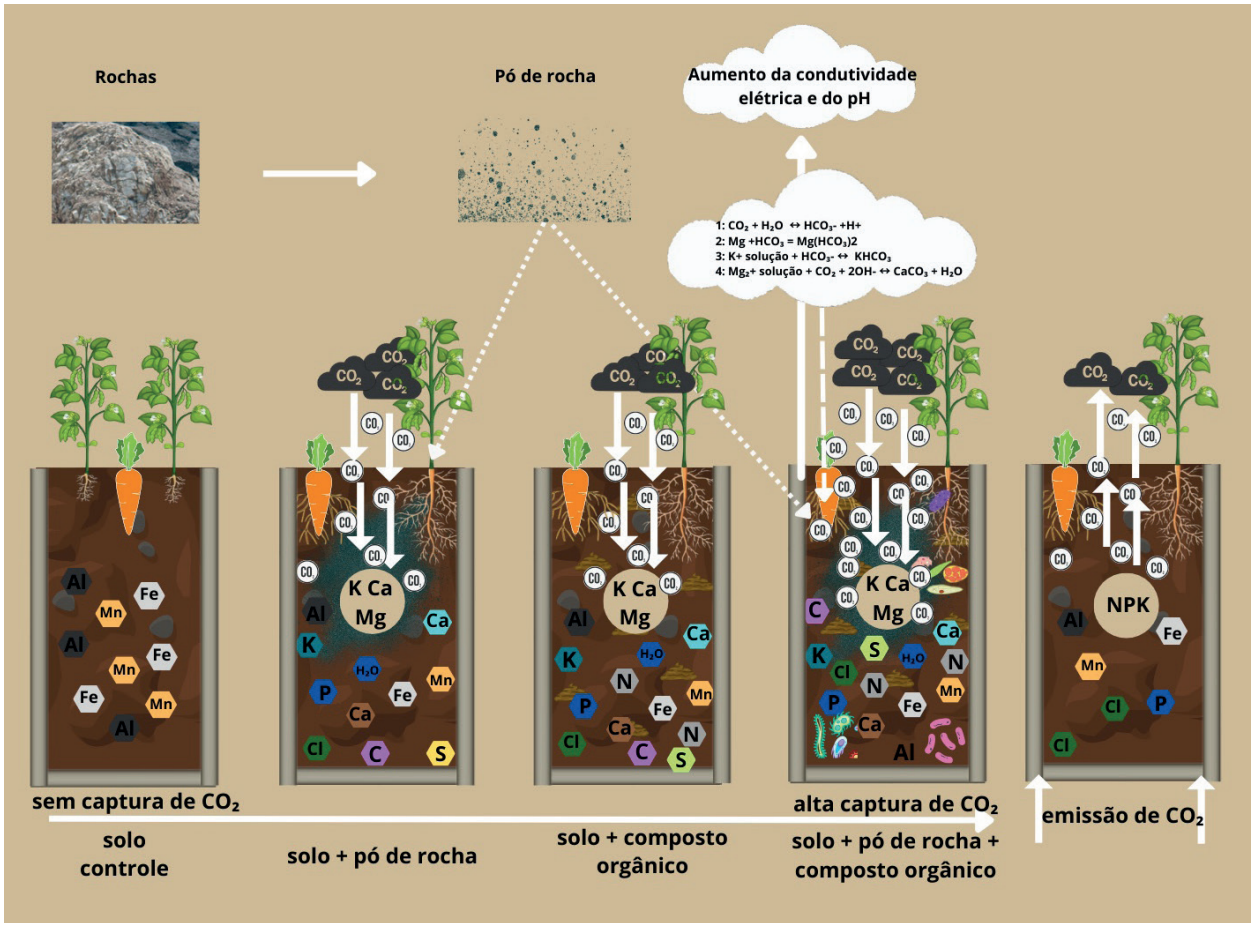
Os íons (Mg^{2+}) liberados se combinam com CO_2 atmosférico e são convertidos em bicarbonatos dissolvidos em água, que, ao serem transportados pelos rios e, eventualmente, para os oceanos, são precipitados como carbonatos e permanecem armazenados por milhares de anos.

Porém, uma parte do resultado dessas reações pode permanecer nos solos como minerais estáveis (processo de carbonatação). A acidez do solo e a atividade biológica aceleram a dissolução dos minerais. A carbonatação mineral se refere à formação de carbonatos pedogênicos após a reação do CO_2 atmosférico com produtos de hidrólise de silicato ($Ca^{2+}/Mg^{2+}/K^{+}$) em formas disponíveis/trocáveis no solo (BEERLING et al. (2018); SNÆBJÖRNSDÓTTIR et al., 2020). No entanto, a principal limitação para a ocorrência significativa desse processo no solo se deve às condições de pH necessárias para acelerar as reações de hidrólise dos silicatos, as quais diferem daquelas necessárias para a precipitação e a estabilização dos carbonatos (MELLO, PEREZ, 2009). Outra possibilidade para a carbonatação é a simples formação de pares iônicos entre os cátions $Ca^{2+}/Mg^{2+}/K^{+}$ e HCO^{3-}, o que poderia facilitar a lixiviação do ânion bicarbonato para as águas subterrâneas, mantendo-o estável e preso nessa forma por um período indefinido de tempo.

Estudos desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa em Rochagem (GPR), da Universidade de Brasília/CNPq, estão avaliando o potencial de captura de carbono de distintos tipos de rochas derivadas de diferentes regiões brasileiras e têm comprovado que a adição de fontes minerais ao solo promove um processo contínuo e permanente de liberação de cátions para o solo e para os fluidos que interagem e drenam o sistema solo-raiz-planta.

Esses resultados corroboram com os princípios estabelecidos pelos processos de ERW, bem como reforçam os pressupostos da tecnologia da rochagem, conforme proposto por Hensel (1894), Leonardos et al. (1987, 2000) e Theodoro (2000, 2022), que afirmam que rochas ricas em determinados macro e micronutrientes são capazes de ampliar a oferta de nutrientes em solos quimicamente empobrecidos. O processo pode ser ilustrado da seguinte forma (Figura 12).

Figura 12 - Desenho esquemático do processo de captura de carbono no solo



Fonte: Modificado de Theodoro et al., 2026 (https://doi.org/10.3390/su18104687).
Elaborado por: Manuel Batista Viana.

Não somente, a pesquisa do GPR comprovou que existe um efeito sinérgico entre a adubação com rocha moída (REM) e a matéria orgânica (MO), para viabilizar o aumento da solubilidade dos compostos minerais e, consequentemente, uma maior liberação de cátions para a solução do solo. Os resultados demonstraram que as rochas testadas contribuíram diretamente para o aumento da lixiviação de carbono, bem como para o aumento da solubilidade de Ca, Mg, K, P e S, além de incrementos na CTC e nos níveis de pH do solo, na presença de MO.

É importante compreender que parte do processo de sequestro de carbono inorgânico está associado à formação de minerais secundários no solo, durante o processo de intemperismo de rochas silicatadas (Beerling et al., 2020; Snæbjörnsdóttir et al., 2020), sendo que a presença de cátions liberados pela hidrólise dos silicatos (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+) tende a favorecer o processo de carbonatação, considerado uma das principais vias de sequestro de CO_2 atmosférico, transformando-o em carbonatos estáveis no solo (Benson e Cole, 2008).

Porém, como já mencionado por diversos autores, particularmente Manning et al.

(2022), para quantificar o potencial de captura de CO_2 pelas rochas é preciso ter em conta que o ciclo do carbono (derivado de fontes orgânicas, inorgânicas e/ou atmosféricas) é complexo. Entender o papel e as funções ligadas ao carbono orgânico no solo (COS) e ao carbono inorgânico do solo (CIS) e como essas duas formas podem facilitar o sequestro de carbono atmosférico são fatores que definem o potencial do processo de ERW. Portanto, as metodologias de quantificação precisam levar esses pontos em consideração, para não inflar os resultados.

Apesar das ótimas possibilidades elencadas a partir do uso dos remineralizadores, outras ações importantes devem ser consideradas para atender demandas e interesses locais, mas sempre tendo em mente que não se trata de transferir tecnologias ou práticas, mas de aliar e valorizar experiências e estratégias de produção que podem (e devem) ser tão diversas quanto são os interesses dos distintos estabelecimentos produtivos (grandes e pequenos produtores) e as aptidões dos agroecossistemas. Nesse aspecto, assimilar, praticar e facilitar o apoio às diversas oportunidades e iniciativas produtivas - incluindo os sistemas de consorciamento entre plantas, animais e árvores, bem como de materiais disponíveis, local ou regionalmente - tende a popularizar formas de produção que conduzam às transformações socioprodutivas, econômicas e ambientais, mas acima de tudo, que possam ampliar a segurança alimentar e, principalmente, nutricional da população.

3.2.2 Conteúdo mineral e segurança nutricional

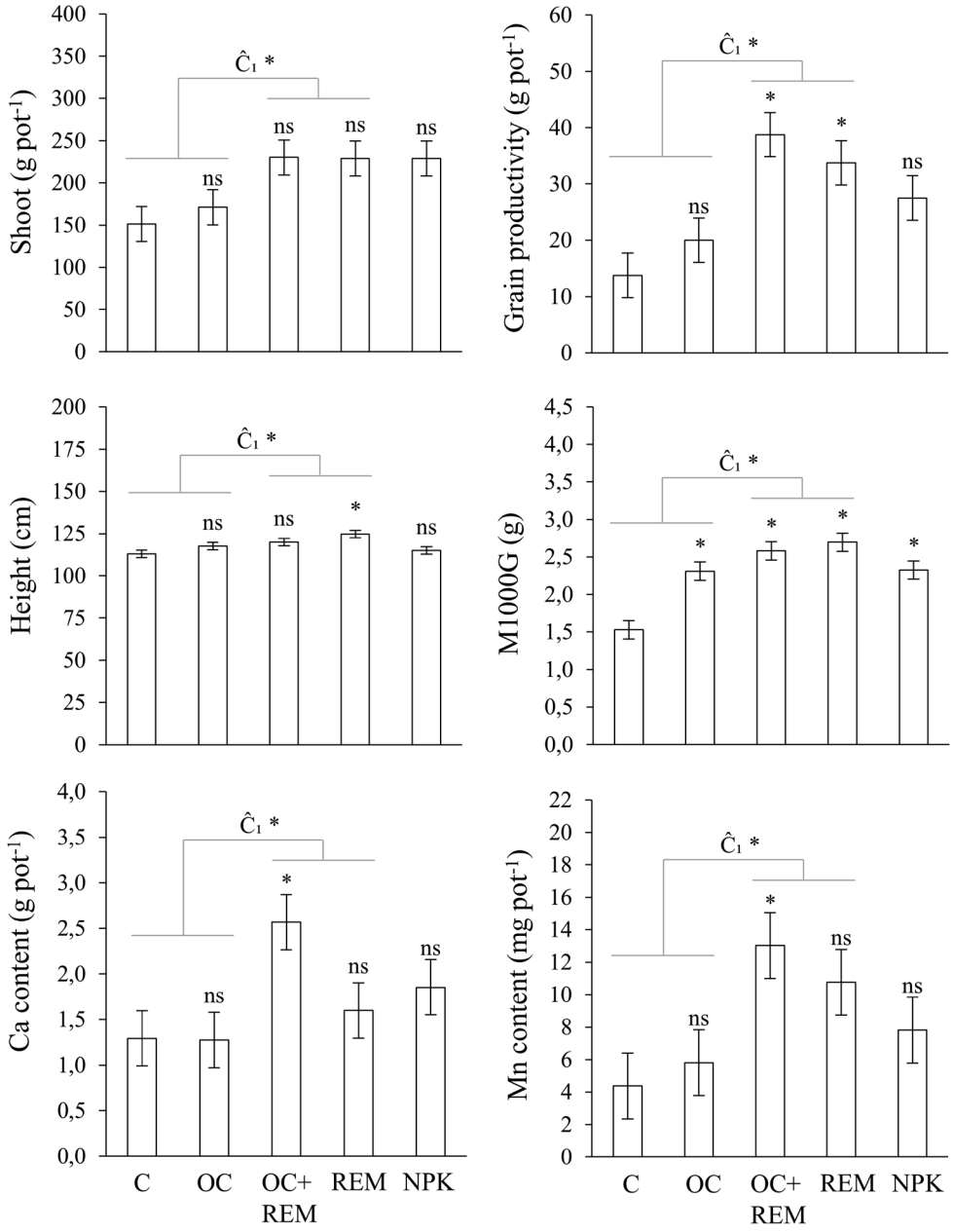
No que se refere à ampliação do conteúdo nutricional dos alimentos produzidos a partir do uso dos remineralizadores, é necessário ter em mente que a discussão sobre segurança alimentar está evoluindo. Já não se trata apenas de produzir grandes volumes, mas de garantir a qualidade nutricional dos alimentos aliada à adoção de práticas de produção mais sustentáveis. Esse cenário impulsiona o desenvolvimento de novas oportunidades, especialmente em países que precisam conciliar desafios opostos, como a fome e a alta produtividade.

O Brasil é um exemplo desse paradoxo. Apesar de ser um dos maiores produtores de grãos e de proteína animal do mundo, grande parte de sua produção é voltada à exportação de produtos com baixo valor agregado. Essa estratégia gera lucros no curto prazo, mas compromete o estoque de recursos naturais que sustentam a produção no médio e longo prazo, pois, junto com os produtos agrícolas, o País exporta solo fértil, água e energia. Além disso, o Brasil não pode permitir que parte de sua população viva em situação de insegurança alimentar. Ainda que a exportação de produtos agrícolas seja um negócio importante para equilibrar a balança comercial brasileira, não se justifica que aqui ainda exista fome. E, em especial, que essa ambiguidade ocorra nas áreas rurais, onde a imensa maioria da produção agrícola é obtida.

Recentemente, o Brasil saiu mais uma vez do mapa da fome no mundo, mas muitas contradições ainda carecem de soluções. Entre essas, pode-se destacar o uso de remineralizadores, que são insumos multinutrientes, o que tende a enriquecer os alimentos com maior diversidade de nutrientes, afetando positivamente a segurança nutricional. Theodoro (2022) ilustra essa capacidade dos REM por meio de dois estudos que comparam o valor nutricional dos alimentos. Ela menciona uma pesquisa conduzida no Reino Unido por McCance e Widdowson (2002), que comparou o valor nutricional de diversos alimentos (frutas, vegetais e carnes) entre 1941 e 1991. Os autores observaram que houve uma deterioração significativa no conteúdo mineral dos alimentos nesse período e que a perda de nutrientes estava ligada ao aumento de doenças crônicas, um problema agravado pelo uso intensivo de herbicidas, fungicidas e hormônios na agricultura moderna. Nesse estudo, os autores citam o caso do tomate, mostrando que, para obter o mesmo valor nutricional de um tomate produzido em 1941, seria preciso consumir 10 tomates produzidos em 1991. Eles destacam a perda substancial de macro e microelementos, mesmo aqueles como potássio (K) e fósforo (P), que são comumente aplicados na forma dos fertilizantes a base de NPK. No entanto, a perda mais expressiva foi de cobre (Co), molibdênio (Mo) e zinco (Zn), o que provavelmente indica o esgotamento mineral dos solos e a não renovação das fontes desses micronutrientes.

Um estudo conduzido no Brasil confirmou esse empobrecimento nutricional de alimentos. Na pesquisa conduzida por Burbano et al. (2022) sobre a cultura da quinoa, foi demonstrada uma relação direta entre o conteúdo nutricional da planta e os insumos utilizados. As plantas cultivadas com remineralizadores apresentaram maiores concentrações de potássio (K), cálcio (Ca), manganês (Mn) e boro (B) em comparação com aquelas que receberam apenas a adubação tradicional com NPK. Além disso, os autores mostraram que a produtividade de grãos da quinoa nos tratamentos com remineralizador foi, em média, 115 % superior aos tratamentos sem remineralizador, com destaque para o tratamento que continha composto orgânico mais REM (CO+REM). O parâmetro que possivelmente mais influenciou este desempenho foi o tamanho dos grãos, uma vez que a massa de 1000 grãos (M1000G) foi 76% superior no tratamento CO+REM em relação ao tratamento controle, conforme pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Parâmetros de crescimento da quinoa



Fonte: Burbano, et al, (2002).

Parâmetros de crescimento da quinoa (massa seca da parte aérea, produtividade de grãos, altura das plantas e massa de mil grãos) e conteúdos de Ca e Mn na parte aérea das plantas em função da aplicação de composto orgânico (OC), composto orgânico com basalto (OC+Rem), somente pó de basalto (Rock), somente adubação mineral (NPK) e controle. Médias seguidas por "*" diferem do controle de acordo com o teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro. Contrastes C_1 = (Rock + OC + Rem) - (Controle + Org. Comp.) seguidos por "*" diferem de zero pelo teste de Bonferroni modificado a 5% de probabilidade de erro. Médias (n=4) ± erro padrão do experimento.

A investigação desenvolvida pelo Grupo de Pesquisa em Rochagem da UnB concluiu indicadores semelhantes. Diferentes tipos de rochas têm o potencial de fornecer uma

combinação de nutrientes distintos. Os estudos do GPR indicam que as misturas de rochas com matéria orgânica potencializam e aumentam essa diversidade nos alimentos produzidos (Theodoro et al., 2025).

3.3 Desafios para ampliação do uso dos Remineralizadores no Brasil

Essas pesquisas, associadas ao que já se conhece de efeitos diretos e indiretos obtidos a partir do uso dos remineralizadores, mostram que, apesar dos resultados animadores, ainda existem muitos desafios a serem vencidos. Ao lado das conquistas, será necessário vencer uma série de limitações para o pleno uso dos Remineralizadores, entre as quais podem se citar:

- **Variabilidade dos resultados produtivos:** Os resultados são dependentes do tipo de rocha, do solo, das condições climáticas e de outros fatores, como manejo, presença de matéria orgânica de cobertura e consórcio entre plantas;
- **Tempo de resposta:** A liberação lenta e gradual de nutrientes pode comprometer a obtenção de plantas de ciclo curto (espécies agrícolas);
- **Distância:** A distância entre as áreas de produção (mineração) e as áreas de consumo (estabelecimentos agrícolas) afeta os benefícios econômicos em função do preço do frete;
- **Divulgação:** Baixa ou ausente divulgação dos benefícios e potencialidades nos cursos de formação e entre os usuários (agrônomos, geólogos e agricultores);
- **Carência de recursos para ampliação das pesquisas:** Conhecer os mecanismos de ação da rochagem e seus impactos a longo prazo;
- **Criação e Implementação de políticas públicas** que se complementem e que incentivem os agricultores a recorrer a esse tipo de insumo;
- **Ausência de investimento** para o financiamento de projetos minerais e agrícolas que incentivem a oferta de crédito e de assistência técnica qualificada para esse fim;
- **Expansão da oferta de diferentes tipos** de remineralizadores para atender demandas distintas (de nutrientes, de preços de regiões);
- **Qualificação da assistência técnica** para esse fim, com treinamento e capacitação de geólogos de agrônomos, entre outros, para formar profissionais que entendam as dinâmicas regionais dos agroecossistemas e a oferta de remineralizadores disponíveis;
- **Elevação dos remineralizadores à condição de insumo estratégico**, o que deverá repercutir na integração de sistemas alimentares e da biodiversidade; e
- Fortalecimento ou criação de novas rotas de mercados, valorizando **iniciativas regionais, como é o caso dos Arranjos Produtivos Locais de perfil agrícola-mineral.**

4. Arcabouço normativo dos Remineralizadores

Apesar desses desafios, o Brasil é protagonista no uso de rochas moídas. Parte desse destaque se deve à instituição do arcabouço normativo que inseriu os remineralizadores como um insumo agrícola e a posterior regulamentação da Lei. Esse aparato legal está presente nas seguintes normativas:

1. Lei nº 12.890/2013 (Lei dos Remineralizadores)
2. Decreto nº 8.384/2015
3. Instrução Normativa (IN) 05 e 06/2016 (MAPA)
4. Lei nº 6.894/1980 (Lei dos Fertilizantes)
5. Decreto nº 11.518/2023 (PNF)

» Brasil, 2013. Lei nº12.890/2013 - Altera a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/l12890.htm

» Brasil, 2015. Decreto nº 8.384 – Regulamenta a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2014/decreto/D8384.htm

» Brasil/Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Instrução Normativa nº 05/2016. https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393137/do1-2016-03-14-instrucao-normativa-n-5-de-10-de-marco-de-2016-21393106

» Brasil, 1980. Lei dos Fertilizantes 6.890/10980. https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/lei-6894-de-16-12-80-alterada-pela-lei-12890-2013.pdf

» Brasil, 2023 Decreto que estabelece o PNF. https://www.gov.br/mme/pt-br/acesso-a-informacao/legislacao/decretos/2023/decreto-n-11-518-2023.pdf/view

4.1 Lei 12.890/2013

Essa Lei alterou a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, ao inserir remineralizadores como um tipo de insumo agrícola apto ao uso e à comercialização no Brasil. Definiu *remineralizadores* (REM) como o *material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho por processos mecânicos e que altere os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promova a melhoria das propriedades físico-químicas ou da atividade biológica do solo" (Brasil, 2013*) https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/l12890.htm

A Lei estabelece que esses materiais devem sofrer apenas redução e classificação do tamanho por meio da moagem (cominuição). Esse processo de redução do tamanho das partículas aumenta a superfície específica dos grãos, além de facilitar a solubilização

dos compostos que formam a rede cristalina dos minerais, pela ação de diversos tipos de fluídos (incluindo a água) e por microrganismos presentes no solo. Os compostos químicos liberados estão na forma de óxidos de potássio (K_2O), magnésio (MgO), cálcio (CaO), fósforo (P_2O_5), sílica (SiO_2) e uma grande quantidade de micronutrientes como Co, Se, Cr, Pb, Li, Th. Cs, Zr, Br, Ba, F, Sr, Cd, I, V, entre outros. Pode-se pensar na liberação lenta de grande parte dos elementos que compõem a tabela periódica.

4.2 Instrução Normativa nº 05/ 2016 – MAPA

Art. 1º - Ficam estabelecidas as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. (Brasil, 2016 - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento):

https://www.in.gov.br/materia//asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393137/do1-2016-03-14-instrucao- normativa-n-5-de-10-de-marco-de-2016-21393106

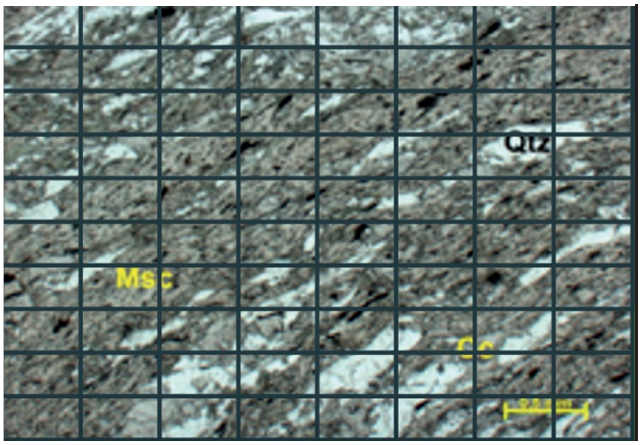
Art. 4º - Condicionantes e garantias mínimas:

i. Soma de bases - SB (K_2O, MgO e CaO) ≥ 9% em peso/peso, sendo K_2O > 1% (Inc. II e III). Esses dados são obtidos por meio de análises de química total de elementos maiores e traços.

ii. Proporção de sílica livre (SiO_2 na forma de quartzo) ≤ 25% do total (§2º, Inc I). Esse indicador pode ser obtido pelas seguintes análises:

   a. Petrografia (lâminas delgadas polidas) analisadas em microscópio ótico em que é possível descrever as relações texturais, mineralógicas e níveis de alteração (intemperismo) das assembleias mineralógicas presentes nas rochas e onde é feita a contagem de pontos da presença de quartzo. Figura 14 mostra como é possível efetuar a contagem de pontos do mineral quartzo em uma lâmina delgada e a estrutura cristalina (Figura 15).

Figura 14 - Fotomicrografia em seção polida de um clorita muscovita xisto e grade para contagem de pontos.

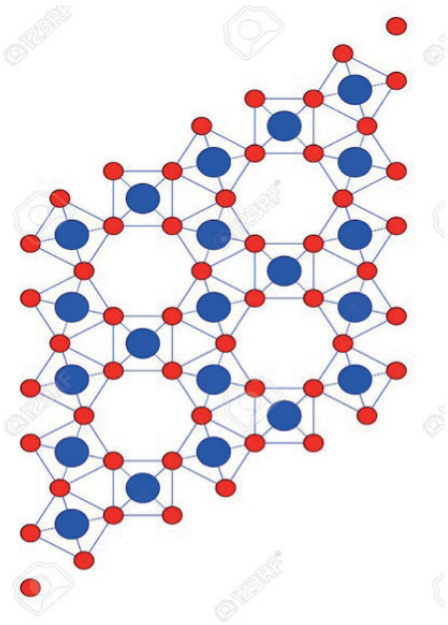


Mineral	Porcentagem (%)
Quartzo	21,29
Calcita	45,43
Muscovita	18,43
Clorita	13,43
Hematita	0,86
Epidoto	0,57

Obs.: As abreviações Qtz (Quartzo), Msc (Muscovita), Cc (Calcita).

Figura 15 - Cristal de quartzo e sua estrutura cristalina - Oxigênio (Vermelho) e Silício (Azul)





b. Difratometria de Raio-X e Rietveld também podem fornecer uma ideia aproximada da quantidade de quartzo.

iii. Níveis máximos permitidos para quatro Elementos Potencialmente Tóxicos - EPTs (Hg, Pb, As, Cd) (§2º, Inc II).

Não serão registrados no MAPA, ficando vedadas a produção, a importação e a comercialização no País de remineralizadores que contiverem EPTs, com teores superiores a:

a) para Arsênio (As): 15 ppm;

b) para Cádmio (Cd): 10 ppm;

c) para Mercúrio (Hg): 0,1 ppm;

d) para Chumbo (Pb): 200 ppm.

Para realizar as análises geoquímicas semiquantitativas de macronutrientes, micronutrientes e outros, recomenda-se o uso de espectrometria de fluorescência de raios-X (XRF) para medir os teores de SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, K_2O, NaO, MgO, P_2O_5, MnO e TiO_2, além da determinação de Perda ao Fogo (LOI) a 1000°C, por gravimetria. Os elementos potencialmente tóxicos (EPTs): arsênio (As), chumbo (Pb) e cádmio (Cd) podem ser analisados por espectrometria de emissão óptica por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), enquanto o mercúrio (Hg) deve ser analisado com o Analisador Direto de Mercúrio – DMA/US EPA Method 7473-3. Esses resultados fornecem a primeira fase de enquadramento dos produtos na In 05/2013.

iv. Ph de abrasão - declarados pelo registrante (Inc. IV).

Oferece um indicador da disponibilidade de nutrientes, uma vez que ao se informar

o grau de intemperismo de um material, pode-se antever a velocidade das reações de troca nos fluidos que estarão presentes no solo (Figura 16). Para a análise do pH de abrasão é possível utilizar um medidor de pH de bolso ou de bancada seguindo o método proposto por Grant (1969).

Figura 16 – Aparelho pHmetro



v. Granulometria - declarados pelo registrante (Inc. IV).

Refere-se à distribuição dos tamanhos das partículas que compõem esse material. A granulometria dos materiais adicionados aos solos influencia a capacidade de retenção de água, a aeração e a disponibilidade de nutrientes para as plantas, sendo importante para o desenvolvimento agrícola. O Anexo I da IN 05/2016 estabelece as especificações de natureza física dos remineralizadores (Tabela 05). As análises para especificação de natureza física (análises granulométricas) podem utilizar a metodologia ABNT NBR7181 de 09/2016, que recomenda o uso das peneiras 4,75 mm (ABNT n° 4); 2,36 mm (ABNT n° 7); 2,00 mm (ABNT n° 10); 0,85 mm (ABNT n° 20); 0,30 mm (ABNT n° 50) e balança de precisão.

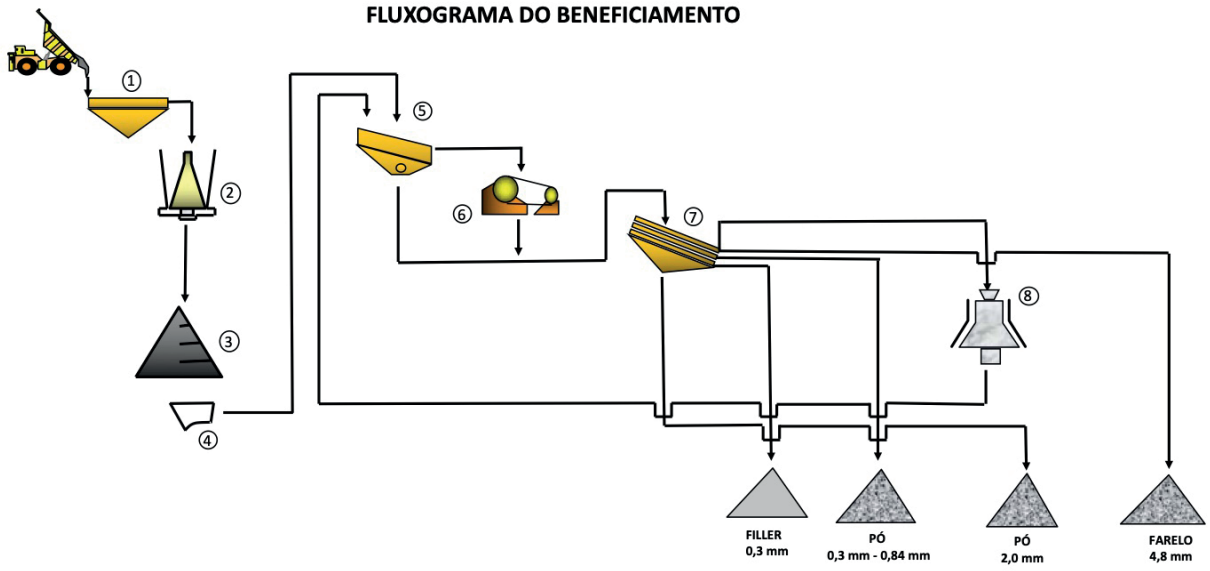
Tabela 05 - Especificações de natureza física dos remineralizadores

ESPECIFICAÇÕES DE NATUREZA FÍSICA DOS REMINERALIZADORES		
ESPECIFICAÇÕES DE NATUREZA FÍSICA	**GARANTIA GRANULOMÉTRICA**	
	PENEIRA	PARTICULAS PASSANTES (PESO/PESO)
Filler	0,3 mm (ABNT Nº 50)	100%
	2,0 mm (ABNT Nº 10)	100%
Pó	0,84 mm (ABNT Nº 20)	70% Minimo
	0,3 mm (ABNT Nº 50)	50% Mínimo
Farelado	4,8 mm (ABNT Nº 4)	100%
	2,8 mm (ABNT Nº 7)	80% Mínimo
	0,84 mm (ABNT Nº 20)	25% Máximo

Fonte: Anexo I IN 05/2016.

Para obter essas granulometrias, as empresas se utilizam de equipamentos que visam adequar o produto às especificações mostradas na Tabela 05. Na figura 17, é mostrado um fluxograma esquemático desse processo (desde a lavra até o produto).

Figura 17 - Fluxograma esquemático do processo de beneficiamento dos remineralizadores



Onde: 1- Alimentador vibratório; 2- Britador de Impacto; 3- Pilha Pulmão; 4- Calha Vibratória; 5- Peneira vibratória Inclinada; 6- Britador de Mandíbulas; 7- Peneira Vibratória Inclinada e 8- Britador de Cone.

Obs.: Elaborado por: Aline Pimenta Caixeta.

No Art. 9 Inc. II da IN 05/2016, ainda está esclarecido que os produtos que não foram testados pela pesquisa brasileira, sem prejuízo do disposto no Art. 4º desta Instrução Normativa, somente obterão o registro após a realização de ensaios agronômicos por instituições oficiais ou credenciadas de pesquisa, conduzidos com plantas e obrigatoriamente em casa de vegetação ou a campo, podendo esses ensaios ser complementados com testes de incubação ou em colunas de lixiviação, que demonstrem de forma conclusiva que o produto se presta ao fim a que se destina.

vi. Testes agronômicos (Art. 9º Inc. II).

Testes agronômicos com plantas são experimentos científicos conduzidos para avaliar o desempenho de cultivos sob diferentes condições, tratamentos ou insumos agrícolas. Esses testes têm como objetivo principal validar a eficácia, a segurança e a viabilidade de produtos, técnicas ou práticas agrícolas antes de sua recomendação em larga escala.

Também têm a função de comparar o desenvolvimento de variedades de plantas quanto à produtividade, ao conteúdo nutricional, à resistência a pragas e a doenças e à adaptação climática. Nos testes agronômicos também é possível analisar as formas de manejo, tais como tipos de irrigação, adubação, consórcios e coberturas do solo. De modo geral, esses testes são necessários para validar novos ou distintos produtos e/ou insumos passíveis de uso, de comercialização e de fiscalização. Os tipos mais comuns de testes agronômicos são:

- **Ensaio de fertilidade do solo:** Mede a resposta das plantas a diferentes doses de nutrientes derivados de distintas fontes (por exemplo, de remineralizadores).
- **Teste de germinação:** Avalia a viabilidade de sementes ou o efeito de tratamentos pré-plantio.
- **Ensaios de incubação, em casa de vegetação, em colunas de lixiviação e a campo:** Controlam variáveis como luz, água e solo para isolar efeitos específicos (Figura 18).
- **Análise de biofortificação:** Verifica o aumento de nutrientes (ex.: Ca, K, Mg, P, Zn, Fe, entre outros) em cultivos.

Métodos e Parâmetros Avaliados:

- **Crescimento vegetativo:** Altura, biomassa, número de folhas.
- **Produtividade:** Peso de grãos/frutos por área.
- **Qualidade fisiológica:** Teor de clorofila, eficiência fotossintética.
- **Resistência a estresses:** Seca, salinidade, pragas.

Figura 18 - Testes agronômicos conduzidos de formas distintas.



Incubação



Vasos em casa de vegetação



Testes a campo



Colunas de lixiviação

Fotos: Tiradas pela autora.

No contexto de remineralizadores de solos, os testes agronômicos são essenciais para:

- Comprovar se os produtos testados (derivados de rochas silicáticas moídas) alteram os níveis de fertilidade do solo, o desenvolvimento das plantas e o conteúdo nutricional;
- Garantir que não haja contaminação por elementos potencialmente tóxicos (EPTs);
- Atender às normas do MAPA (Instrução Normativa 05/2016).

Exemplo: Um teste com remineralizador em milho pode comparar parcelas tratadas e não tratadas, medindo diferenças em produtividade e no teor de nutrientes no solo após a colheita. Atualmente, existem sugestões de protocolo no site do MAPA para registro de novos remineralizadores:

(https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/registro-estab-e-prod/registro-produtos/protocolo-remineralizadores-30-01-19.pdf).

5. O registro de um novo remineralizador

A pesquisa e o registro de um novo remineralizador de solos envolvem uma série de etapas, desde a investigação sobre a ocorrência, as características mineralógicas e químicas das rochas mais adequadas, passando por testes agronômicos e relatórios que apontem as principais propriedades e atributos das rochas que se prestam a essa finalidade.

Mas, antes disso, é necessário que o(a) solicitante percorra uma série de etapas burocráticas, iniciando seu processo na Agência Nacional de Mineração (ANM), ao protocolar um requerimento minerário, onde deve solicitar autorização para pesquisa da área escolhida e da substância a ser pesquisada, segundo as modalidades legais ou regimes de aproveitamento dos recursos minerais. Os dados iniciais podem ser obtidos a partir de dados secundários, produzidos em sua grande maioria pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB). Porém, confirmações em campo são fundamentais para garantir a acurácia das informações. Em determinados casos, a área pode ser solicitada por meio de regime de licenciamento - um processo mais ágil e adequado para áreas de menor extensão, como ocorre frequentemente nas requisições para exploração de calcário.

No entanto, essa regulamentação para remineralizadores ainda não está claramente estabelecida na ANM. Atualmente, todo o processo de requerimento pode ser feito de forma virtual, no sistema eletrônico da Agência. Esse processo pode ser bastante demorado (mais de um ano), em função da grande quantidade de requerimentos protocolados e, em especial, se houver solicitação de esclarecimentos ou de adequação do processo.

No link https://www.gov.br/anm/pt-br/acesso-a-informacao/demandas-processuais estão disponibilizadas informações e outras orientações pertinentes aos processos de requerimentos na ANM. Ressalta-se que a formalização do requerimento está condicionada à obtenção de licenças ambientais complementares e, quando aplicável, a autorizações municipais.

Para empreendedores(as) que já possuam uma autorização de pesquisa ou de lavra e, que, ao longo do processo de beneficiamento da substância lavrada ocorra a geração de materiais de descarte e/ou rejeitos, é possível solicitar um aditamento de Nova Substância, por meio de uma guia de aproveitamento. Nesse caso, é necessário que o(a) requerente apresente um relatório de reavaliação de reserva. Essa iniciativa é aderente aos princípios da sustentabilidade e viabiliza o uso completo dos recursos minerais extraídos, alinhando-se plenamente aos objetivos da economia circular.

No entanto, é **imprescindível** que os estudos iniciais referentes às adequações previstas nas condicionantes e garantias mínimas estabelecidas pela IN 05/2016 - MAPA já tenham sido realizados. Se o material não atender a tais especificações e condicio-

nantes, mas possuir outras vantagens como teores excepcionais de potássio ou de fósforo, ele pode ser enquadrado em uma outra categoria de produto, como fertilizante mineral simples, por exemplo.

Se todas as condições foram satisfeitas, pode-se seguir no processo. Entretanto, é fundamental alertar que: **nem todo pó de rocha pode se converter em um remineralizador.** Assim, se o material gerado tiver sofrido algum tipo de tratamento químico ou térmico ele já não poderá ser enquadrado como REM, conforme determina a Lei 12.890/2013.

Cumpridas as exigências, o(a) demandante ou empreendedor(a) deve procurar instituições credenciadas no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para realizar os testes agronômicos, que têm a função de demonstrar a viabilidade e a eficácia do produto que se pretende registrar. De modo geral, a experimentação agronômica necessita de seis meses a um ano para gerar os resultados. Esses testes seguem os protocolos agronômicos sugeridos pela Embrapa ou pelo MAPA (https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/registro-estab-e-prod/registro-produtos/protocolo-remineralizadores-30-01-19.pdf).

No momento em que a ANM autorizar a pesquisa e/ou o licenciamento e os resultados estiverem consolidados e aderentes às normas, pode-se iniciar o processo de registro do produto e da empresa, inserindo os dados completos da pesquisa no sistema eletrônico do MAPA (SIPEAGRO), os quais serão, posteriormente, analisados pelos técnicos nas Superintendências Federais de Agricultura do MAPA (SFA), presentes em todos os estados brasileiros.

Para se registrar como estabelecimento produtor, os seguintes documentos devem ser apresentados:

i. formulário de registro de produto, contendo a classificação, a caracterização e a forma de obtenção do produto, relacionando as matérias primas utilizadas na formulação e garantias oferecidas;
ii. certificado das análises laboratoriais de caracterização do produto e relatório de pesquisa;
iii. licença de exploração mineral fornecida pela Agência Nacional de Mineração; e
iv. formulário do cadastro do estabelecimento, contendo os seguintes anexos:
    a. cópias do contrato social; CNPJ; Inscrição Estadual/Municipal; Certidão de Quitação de Pessoa Jurídica no Conselho de Classe; Licença ambiental completa ou autorizações equivalentes;
    b. declaração de responsabilidade pelo sistema de identificação de rótulo e/ou etiqueta e propaganda do produto;

c. documentos de controle de qualidade fornecido por laboratório próprio ou de terceiros;
d. documentação de produção (industrialização, acondicionamento e armazenagem); documentação do responsável técnico; e
e. documentação de instalação (croqui de localização com coordenadas geográficas, planta baixa esquemática das instalações de produção e das unidades de processo).

Com base na documentação apresentada e nos resultados das análises mineralógicas, químicas, petrográficas e agronômicas, os técnicos da SFA avaliarão a conformidade do material com as normas regulatórias. Uma vez verificada a adequação às exigências legais, será agendada uma vistoria técnica na unidade de produção para fins de fiscalização, como forma de comprovar se os equipamentos (moinhos, peneiras, esteiras e áreas de armazenamento) estão adequados e condizentes com as informações apresentadas no processo de registro. De modo geral, esse processo de análise pode demorar de três a seis meses.

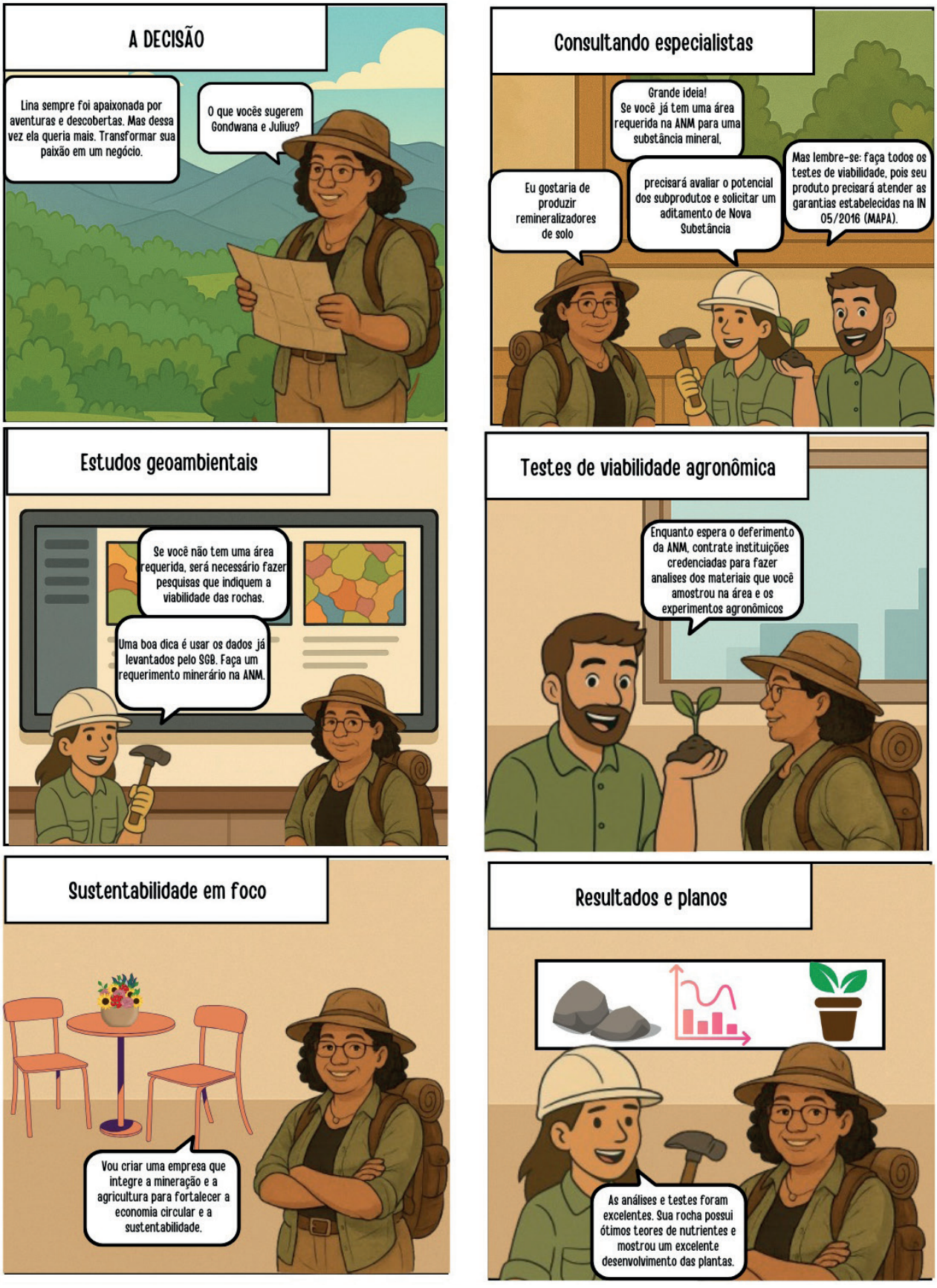
Após a análise e a vistoria *in loco*, é emitido o registro do produto. Apesar de ser um processo que exige tempo e pesquisas multidisciplinares, informações e documentos detalhados, ele funciona como uma garantia para os futuros consumidores, assegurando a qualidade e as especificações do remineralizador.

Portanto, mais do que seguir formalidades burocráticas, o processo de registro de um remineralizador é a principal garantia para o consumidor final, seja ele o grande produtor ou o produtor da agricultura familiar. O registro assegura que o produto realmente oferece os nutrientes informados e está livre de contaminação por EPTs. Esse controle protege tanto o agricultor, que investe na melhoria do solo e na produtividade de sua lavoura, quanto o consumidor final, que busca alimentos que sejam mais nutritivos.

Em última análise, a conformidade com as normas legais é a base para que os remineralizadores se consolidem como uma ferramenta estratégica e confiável para uma agricultura mais sustentável e alinhada aos desafios da segurança alimentar.

De uma forma ilustrativa, a Figura 19 mostra um passo a passo para a obtenção do registro de um remineralizador.

Figura 19 - Passo a passo para a obtenção do registro de um remineralizador





Elaborado por Manuel Batista Viana e Suzi Huff Theodoro em plataformas de Inteligência artificial.

6. O papel do Sistema Confea/Crea e a fiscalização do exercício profissional

O Sistema Confea/Crea e Mútua é uma estrutura organizacional que engloba o Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (Confea), os Conselhos Regionais de Engenharia e Agronomia (Crea) e a Caixa de Assistência dos Profissionais do Crea (Mútua). De maneira simplificada, o sistema tem como objetivo regular, orientar e fiscalizar o exercício das profissões relacionadas à engenharia, agronomia e geociências no Brasil, garantindo a qualidade, a ética e a competência dos profissionais dessas áreas e defendendo os profissionais e toda a sociedade.

O Sistema Confea/Crea e Mútua desempenha um papel fundamental na regulação, orientação e valorização das profissões de engenharia, agronomia e geociências, além de proporcionar suporte e benefícios aos profissionais registrados. Sua atuação contribui para o avanço técnico-científico, o desenvolvimento profissional e o fortalecimento das áreas em todo o Brasil.

Neste sentido, a fiscalização do exercício profissional é importante para garantir a segurança e a qualidade dos serviços prestados, destacando que no processo produtivo da rochagem temos a participação de vários profissionais do Sistema Confea/Crea, em que destacamos os geólogos, engenheiros de minas e agrônomos, com atuação expressiva na aplicação de técnicas e conhecimentos para a exploração, aproveitamento e aplicação de recursos minerais, que no caso da rochagem, consiste na aplicação de rochas moídas no solo para melhoria de sua fertilidade.

Ainda que os dados mostrem um avanço no uso dos remineralizadores, muitas ações precisam ser efetuadas para tornar essa opção tecnológica um grande negócio para o Brasil. Entre tantas, enumeramos as seguintes: i) criação e implementação de políticas públicas que se complementem e que incentivem os agricultores a recorrer a esse tipo de insumo; (ii) expansão da oferta de diferentes tipos de remineralizadores para atender a demandas distintas (de nutrientes, de preços e regiões); (iii) incentivos de crédito e de assistência técnica qualificada para esse fim; (iv) investimentos em pesquisa; (v) treinamento e capacitação de geólogos e agrônomos, entre outros, para formar profissionais que entendam as dinâmicas regionais dos agroecossistemas e a oferta de remineralizadores disponíveis; (vi) elevação dos remineralizadores à condição de insumo estratégico, o que deverá repercutir na integração de sistemas alimentares e da biodiversidade; e (vii) fortalecimento ou criação de novas rotas de mercados, valorizando iniciativas regionais, como é o caso dos Arranjos Produtivos Locais de perfil agrícola-mineral.

7. Considerações Finais

Este Manual procurou mostrar que o uso de fontes minerais, amplamente disponíveis em todas as partes do planeta, tem a capacidade de recuperar fertilidades esgotadas, favorecer produções agrícolas, sequestrar CO_2 e, ainda, recuperar áreas degradadas. Além disso, baseando-se em vários autores, foi possível mostrar que os materiais derivados de rochas silicáticas (remineralizadores), considerados de baixa solubilidade, favorecem mecanismos bioquímicos que ampliam a oferta de nutrientes, a depender dos objetivos produtivos.

A adoção de novas rotas tecnológicas, como é o caso dos remineralizadores, configura-se como uma estratégia importante para assegurar e manter o papel de vanguarda da agricultura brasileira, com a vantagem de garantir mais autonomia para o setor e para o País, no que se refere ao abastecimento interno de insumos.

Porém, é vital a compreensão de que essas fontes de nutrientes têm uma outra dinâmica, tanto na quantidade (teores disponíveis) quanto no manejo dos agroecossistemas. Ao contrário do uso de fontes solúveis (com oferta restrita de nutrientes), que forçam às plantas as respostas específicas, os remineralizadores se caracterizam como fontes de multinutrientes, que interagem no solo de forma mais completa e complexa, favorecendo a produção de alimentos mais nutritivos. Dependendo da origem, da gênese e da estrutura cristalina das rochas, os remineralizadores podem conter e fornecer uma imensa variedade de compostos ou substâncias importantes para resguardar a saúde e a economia. Essas características garantem que a remineralização dos solos possa ser entendida como um banco de nutrientes disponível por períodos de tempos mais longos. Trata-se do efeito residual, que garante o rejuvenescimento permanente do solo.

Ainda que a adoção desse caminho demande tempo, espera-se que o compartilhamento de experiências exitosas e o estabelecimento de novas formas para o enfrentamento de problemas relativos à produção agrícola, à degradação dos solos e à captura de carbono sinalizem um novo caminho que permita a construção de diferentes perspectivas de um futuro mais seguro, do ponto de vista produtivo, alimentar e ambiental.

No atual momento civilizatório, muitos outros problemas, impasses e injustiças precisam ser discutidos. Porém, uma condição essencial diz respeito à qualidade e à sanidade dos agroecossistemas, para preservar a vida. Nessa lógica, aprimorar a capacidade produtiva e a preservação dos recursos pode restabelecer a aliança ou os vínculos dos seres humanos com o solo que derivou das rochas, estas geradas para possibilitar a vida. Estamos, portanto, frente a uma oportunidade de mudar os paradigmas!

8. Referências bibliográficas

ALMEIDA, E., SILVA, F. J. P., RALISCH, R. Powdered rock to revitalize soils. LEISA Magazine, v. 22, n. 4, 2006.

ANDA. Principais indicadores do setor de fertilizantes. [ANDA-National Association for the Diffusion of Fertilizers]. Principais indicadores do setor de fertilizantes, São Paulo. 2024. Disponível: https://anda.org.br/wp-content/uploads/2023/03/Principais_Indicadores_2022.pdf

BADR, M. A. (2006). Efficiency of K-feldspar combined with organic materials and silicate dissolving bacteria on tomato yield. Journal of Applied Science Research, 2, 1191-1198.

BEERLING, D.J., LEAKE, J.R., LONG, S.P., SCOLES, J.D., TON, J., NELSON, P.N., BIRD, M., KANTZAS, E., TAYLOR, L.L., SARKAR, B., KELLAND, M., DELUCIA, E., KANTOLA, I., MULLER, C., RAU, G., HANSEN, J. 920180. Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. Nature Plants 4**.** 138-147. https://doi.org/10.1038/s41477-018-0108-y.

BEERLING, D.J., KANTZAS, E.P., LOMAS, M.R. et al. (2020). Potential for large-scale CO_2 removal via enhanced rock weathering with croplands. Nature 583, 242–248. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9

BEERLING, D. J., EPIHOV, D. Z., KANTOLA, I. B., MARTERS, M.D., REERSHEMIUS, T., PLANAVSKY, N. J., REINHARD, C. T., JORDAN, J. S., THORNE, S.J., WEBER, J., MARTIN, M. V., FRECKLETON, R. P., HARTLEY, S. E., JAMES, R. H., PEARCE, C. R., DELUCIA, E. H., BANWART, S. A. (2024) Enhanced weathering in the US Corn Belt delivers carbon removal with agronomic benefits. PNAS 121(9). https://doi.org/10.1073/pnas.2319436121.

BRASIL (2013) Lei 12.890/2013 de 10 de dezembro de 2013 - Altera a Lei no 6.894, de 16 de dezembro de 1980. disponível: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/l12890.htm.

BRASIL/ Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2016) Instrução Normativa N.º 05/ 2016. Disponível: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393137/do1-2016-03-14-instrucao-normativa-n-5-de-10-de-marco-de-2016-21393106

BURBANO, D. F. M., THEODORO, S. H., CARVALHO, A. X. M., RAMOS, C. G. (2022) Crushed volcanic rock as soil remineralize: a strategy to overcome the global fertilizer crisis. Natural Resources Research, 31: 2197-2210. https://doi.org/10.1007/s11053-022-10107-x.

CARDOSO, I. M.; MUGGLER, C. C.; FÁVERO, C.; MENDONÇA, E. S.; OLIVEIRA, T. S.; LIMA, A. C. R.; CASALINHO, H. D.; FERNANDES, R. B. A (2018) Ressignificar nossas percepções sobre o solo. In: Cardoso, Irene M.; Fávero, Celso. (Org.). Solos e agroecologia. (Coleção Transição Agroecológica - Vol 4). Brasília I. M.: Embrapa, pp. 101-128.

CARVALHO, A. M. X. 2012. Rochagem e suas interações no ambiente solo: contribuições para aplicação em agroecossistemas sob manejo agroecológico. Tese de Doutorado Universidade Federal de Viçosa. 166p.https://locus.ufv.br//handle/123456789/1631.

CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA – CONFEA (2023). Cartilha Prática de Gestão de Entidades do Sistema Confea - Crea - Mútua: Um guia para uma gestão técnica e eficiente. Brasília-DF, Confea.

FAO. 2023. Statistical Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. Disponível: https://www.fao.org/faostat/en/#data

GOMIDE C. S., MEDEIROS F. P, MATHEUS A., OLIVEIRA V. S., OLIVEIRA L. C., MOURA L. H. G., RAMOS C. G., THEODORO S. H. (2025) The potential of remineralizers and bioinputs for expanding the sovereignty of tropical agriculture (NO PRELO)

GUO, F., SUN, H., YANG, J., ZHANG, L., MU, Y., WANG, Y., WU, F. (2023). Improving food security and farmland carbon sequestration in China through enhanced rock weathering: Field evidence and potential assessment in different humid regions. Science of the Total Environment. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166118

HARDOIM, P. R., MARTINS, E.S., MARTINS, É.S. (2023). Agricultura Sustentável Tropical: casos de sucesso. Informe Agropecuário. Informe Agropecuário, EPAMIG, Remineralizadores e a fertilidade do solo, Belo Horizonte, v.44, n.321, p.79-92. Disponível: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1156764/1/Eder-Agricultura-sustentavel-tropical.pdf

HINSINGER P. (2001) Bioavailability of inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. Plant and Soil 237, 173–195. https://doi.org/10.1023/A:1013351617532

HENSEL, J., 1894. Bread from Stones: A New and Rational System of Land Fertilization and Physical Regeneration. AJ Tafel.

HINSINGER, P., GILKES, R.J. (1997) Dissolution of phosphate rock in the rhizosphere of five plant species grown in an acid, P-fixing mineral substrate. Geoderma, 75 (3–4): 231-249. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00094-8

ILCHENKO, W., GUIMARÃES, D. (1953) Sobre a possibilidade de utilização agrícola dos sienitos nefelinicos do Planalto de Poços de Caldas. MG., Inst. Teen. Avulso. 15, 16p.

KANTOLA, I. B., BLANCBETES, E., MASTERS, M. D., CHANG, E., MARKLEIN, A., MOORE, C. E., von HADEN, A., BERNACCHI, C. J., WOLF, A., EPIHOV, D. Z., BEERLING, D. J., DELUCIA, E. H. (2023) Improved net carbon budgets in the US Midwest through direct measured impacts of enhanced weathering. *Global Change Biology*, 29, 7012–7028. https://doi.org/10.1111/gcb.16903

KELLAND, M. E., WADE, P. W., LEWIS, A. L. et al. (2020) Increased yield and CO_2 se-

questration potential with the C_4 cereal *Sorghum bicolor* cultivated in basaltic rock dust-amended agricultural soil. Global Change Biology. https://doi.org/10.1111/gcb.15089.

KELLER, W. D. (1950) The principles of chemical weathering. Lucas Broders pp.: 412,

LEFEBVRE, D., GOGLIO, P., WILLIAMS, A., MANNING, D. C., AZEVEDO, A. C., BERGMANN, M., MEERSMANS, J., SMITH, P. (2019) Assessing the potential of soil carbonation and enhanced weathering through Life Cycle Assessment: a case study for Sao Paulo State, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 233(2), pp. 468-481. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.099

LEONARDOS, O.H., THEODORO, S.H., ASSAD, M.L. (2000). Remineralization for sustainable agriculture: a tropical perspective from a Brazilian viewpoint. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 56: 3–9. https://doi.org/10.1023/A:1009855409700.

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) p. 361-370. https://doi.org/10.1016/0009-2541(87)90143-4

LEONARDOS, O. H., FYFE, WS, KRONBERG, B.I (1976) Rochagem: O método de aumento da fertilidade em solos lixiviados e arenosos. Anais 29 Cong. Brasil. Geol., BH, p. 137-145,

MANNING, D. A. C., THEODORO, S. H. (2018). Enabling food security through use of local rocks and minerals. Extractive Industries and Society, 7(2), 480–487. https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.11.002

MANNING, D. A. C. 2018. Innovation in resourcing geological materials as crop nutrients. Natural Resources Research. 27(2): 217–227. https://doi.org/10.1007/s11053-017-9347-2

MANNING**,** D.A. C. (2013) Why do crushed silicate rock fertilizers sometimes not work? In: Theodoro, S., Martins, E. S., Fernandes, M. M. and Carvalho, A. M. X. Proceeding of II Stone Meal Brazilian Congress, Poços de Caldas/MG. Brazil. 74-81

MANNING, D. A. C. (2010). Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. Agronomy for Sustainable Development, 30: 281–294.https://doi.org/10.1051/agro/2009023.

MARTINS, E. S., THEODORO, S. H., BERNARDEZ, F. F. G., LUCHESE, A. V., BERGMANN M., SIQUEIRA D. S.; TEIXEIRA, A., AZEVEDO A. C., CURTIS, J. C. D. (2024). Produção Brasileira de Remineralizadores e Fertilizantes Naturais: 2019 a 2023. Revista Novo Solo. Disponível: https://abrefen.org.br/2024/11/08/artigos-producao-brasileira-de-remineralizadores-e-fertilizantes-naturais-2019-a-2023/

MARTINS, É. S.; MARTINS, E. S.; HARDOIM, P. R. (2023). Princípios Geoquímicos, Mineralógicos e Biológicos do Manejo de Remineralizadores de Solos. Informe Agropecuário, EPAMIG, Remineralizadores e a Fertilidade do Solo, Belo Horizonte, Volume 44, No. 321, pp. 26–393. Disponível: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1156783/1/Eder-principios-geoquimicos-mineralogicos.pdf

MBISSIK, A., ELGHALI, A., OUABID, M., RAJI, O., BODINIER, J-L., EL MESSBAHI, H. 2021. Alkali-Hydrothermal Treatment of K-Rich Igneous Rocks for Their Direct Use as Potassic Fertilizers. Minerals, 11: 140. https://doi.org/10.3390/min11020140

MC CANCE, R. A., WIDDOWSON, E. M. (2002) The Composition of Foods, Royal Society of Chemistry. ISBN: 0854044280. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/971021/McCance_and_Widdowsons_Composition_of_Foods_integrated_dataset_2021.pdf

MEDEIROS, F. P., THEODORO, S. H., CARVALHO, A. M. X., OLIVEIRA, V. S., OLIVEIRA, L. V., ALMEIDA, R. A. P., VIANA, M. B.., GOMIDE, C. S (2025) The combination of crushed rock and organic matter enhances the capture of inorganic carbon in tropical soils, Journal of South American Earth Sciences, 152. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.105254

MELGAREJO, L. (2013) Entre a miopia destrutiva e resiliência construtiva: dez anos de transgenia e Agroecologia no Brasil. Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável 6, 67p.

MELLO, J. W. V., PEREZ, D. V. (2009) Equilíbrio químico das reações no solo. In: Alleoni, L. R. F. E, Melo, V. F. (Ed.) Química e Mineralogia do Solo: Parte I - Conceitos básicos. Viçosa: SBCS.

PRIMAVESI, A.M. 2002. Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais. Ed. Nobel. São Paulo. ISBN 85-213-0004-2. 550 p.

RAMOS, C. G., HOWER, J. C., BLANC, E., OLIVEIRA, M. L. S., THEODORO, S. H. (2022) Possibilities of using silicate rock powder: An overview. Geoscience Frontiers, 13(1). https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185.

RENFORTH, P., VON STRANDMANN, P. A. E., HENDERSON, G. M. (2015) The dissolution of olivine added to soil: implications for enhanced weathering. Appl. Geochem (61): 109–118. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.05.016

RENFORTH, P (2012) The potential of enhanced weathering in the UK. International Journal of Greenhouse Gas Control. (10) 229-243. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.06.011

SANTOS, M.S., NOGUEIRA, M.A., HUNGRIA, M. (2021) Outstanding impact of Azospirillum brasilense strains Ab-V5 and Ab-V6 on the Brazilian agriculture: Lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. Rev. Bras. Cienc. Solo. https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200128.

SETIAWATI, T.C., MUTMAINNAH, L. (2016) Solubilization of Potassium Containing Mineral by Microorganisms From Sugarcane Rhizosphere. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 9. 108-117. https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.134.

SNÆBJÖRNSDÓTTIR, S. Ó., SIGFÚSSON, B., MARIENI, C., GOLDBERG, D., GISLASON, S. R., OELKERS, E. H. (2020) Carbon dioxide storage through mineral carbonation. Nature

Reviews Earth & Environment, *1*(2), 90-102. https://doi.org/10.1038/s43017-019-0011-8

SOUZA, M. E. , CARDOSO, I. M. , CARVALHO, A. M. X., LOPES, A. P., JUCKSCH, I. (2019) Gneiss and steatite vermicomposted with organic residues: release of nutrients and heavy metals. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agric, v. 8, p. 1, 2019.

SWOBODA, P., DÖRING, T.F., HAMER, M. (2022) Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. Science of the Total Environment, 807. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976.

van STRAATEN, P. (2007). Agrogeology: the use of rocks for crops. Cambridge, Ontário: Environquest Ltda., 2007.

TAVARES, L. F., CARVALHO, A. M. X., CAMARGO, L. G. B., PEREIRA, S. G. F., CARDOSO, I. M. (2018). Nutrients release from powder phonolite mediated by bioweathering actions. Inter. J. of Recycling of Organic Waste in Agriculture. 7: 1-10. https://doi.org/10.1007/s40093-018-0194-x

THEODORO, S. H., LEONARDOS, O. H. (2015). Stonemeal: principles, potencial and perspective from Brazil. In: Goreau TJ, Larson RW, Campe J. Geotherapy: Innovative methods of soil fertility restoration, carbon sequestration and reversing CO_2 increase. CRC Press. USA, 403-418.

THEODORO, S. H., MEDEIROS, F. D. P., CARVALHO, A. M. X. D., OLIVEIRA, V. S., OLIVEIRA, L. C., ALMEIDA, R. M. P., VIANA, M. B., & GOMIDE, C. S. (2026). Rock Dusts: A Silent Revolution for Soil Nutrition and Climate Protection. Sustainability. 18 (10), 4687. https://doi.org/10.3390/su18104687

THEODORO, S. H. (2000) A Fertilização da terra pela Terra: uma alternativa para a sustentabilidade do pequeno produtor rural. 221 p. Ph.D. Universidade de Brasília, Brasília, DF. https://repositorio.unb.br/handle/10482/20881

THEODORO, S. H. (2023). Cartilha da Rochagem - 2ª Edição. Brasília. Disponível: https://sgbeduca.cprm.gov.br/media/adultos/cartilha_rochagem.pdf

THEODORO, S. H., MANNING, D. A. C., CARVALHO, A. X. M., FERRÃO, F. R., ALMEIDA, G. R. (2022) Soil remineralizer: a new rote to sustentability for Brazil, a giant exporting agro-mineral commoditites. In: Yakovleva, N. Nickless, E. (eds) Routledge Handbook of the Extractive Industries and Sustainable Development. 1st Ed. 261-281. https://doi.org/10.4324/9781003001317

THEODORO, S.H. 2021. Ressignificando a Rochagem. In: Theodoro, S.H., Martins, E. S., Monte, M.B. Anais do IV Congresso Brasileiro de Rochagem, 1ed., pp.15-35. Rio de Janeiro: Autografia.

UGARTE, J. F. O., SAMPAIO, J. A., FRANÇA S. C. A. (2005) – Vermiculita. In: Luz et al. Rochas & Minerais Industriais/Ed. CETEM/MCT, 677 – 698.

VIANA M. B., GOMIDE C. S., MEDEIROS F. P., RAMOS C. G., THEODORO S. H. (2025) Avanços e inovações da tecnologia da rochagem no Brasil. Revista Novo solo/RJ. Disponível: https://revistanovosolo.org.br/2025/07/11/avancos-e-inovacoes-da-tecnologia-da-rochagem-no-brasil/

WEERASURIYA, T. J., THILAKARATHNA, P. K., COORAY, P .I. (1996) Evaluation of Phlogopite Mica and K-Feldspar as slow-release multi-nutrient Fertilizers. In the dynamic geosphere, Ed. Gupta, Kerrich,.96.

YANG, X., LONG, Y., SARKAR, B., LI, Y., LÜ, G.I, ALI, A., YANG, J., CAO, YUE-E. (2021). Influence of soil microorganisms and physicochemical properties on plant diversity in an arid desert of Western China. *Journal of Forestry Research*. https://doi.org/10.1007/s11676-021-01292-1

ANEXO I

Lista de artigos publicadas por cientistas brasileiros no tema da rochagem.

Nos últimos anos, pesquisadores brasileiros têm ampliado significativamente o número de publicações sobre rochagem e remineralizadores de solos, tanto em revistas nacionais quanto internacionais. Esse crescimento reflete o aumento das pesquisas e do interesse científico no tema, destacando o potencial desses insumos para a agricultura sustentável. Embora a lista a seguir não esteja completa, ela reúne artigos relevantes que podem servir como base para estudos futuros sobre rochagem, abordando desde aspectos agronômicos até à caracterização de diversos tipos de rochas, bem como interações entre diferentes tipos de rochas, plantas, manejos e agroecossistemas. Alguns dos artigos foram escritos em parceria com pesquisadores internacionais.

1. AQUINO, A. M. DE: TANIGUCHI, C. A. K; MAGINI, C. BERNI, C. V. (2020) The potential of alkaline rocks from the Fortaleza volcanic province (Brazil) as natural fertilizers. Journal of South American Earth Sciences, 1 03. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102800
2. ASSUNÇÃO R. D. V., CASSOL P. C., GRANADOS S. B., MAFRA A. L., BITTENCOURT R. F. P. M. (2024) Microbial-inoculated remineralizers as source of potassium and other nutrients. Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering. 28 (2) https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n2e275193
3. BAMBERG, A. L., MARTINAZZO, R. , SILVEIRA, C. A. P., PILLON, C. N., STUMPF, L., BERGMANN, M., VAN STRAATEN, P., MARTINS, E. S. (2023) Selected Rock Powders as Sources of Nutrients for Soil Fertilization and Maize-Wheat Grain

Production in Southern Brazil. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4411927

4. BORGES, C. S.; RIBEIRO, B.T.; SOUZA, E. T. CURI, N. WENDLING, B. (2019) Effects of phosphate, carbonate, and silicate anions on CO2 emission in a typical oxisol from Cerrado region. V34 N.4 Agriculture Science. https://doi.org/10.14393/BJ-v35n4a2019-42239
5. BENEVIDES FILHO, P.R.R.; BLASKOWSKI, A.E.; RAMOS, M.N.; LESSA, L.G.F.; FILHO, A.N.Z.; ABREU-JUNIOR, C.H.; JANI, A.D.; CAPRA, G.F.; NOGUEIRA, T.A.R. Potential Soil Remineralizers from Silicate Rock Powders (SRP) as Alternative Sources of Nutrients for Agricultural Production (Amazon Region). Minerals 2023, 13, 1255. https://doi.org/10.3390/min13101255
6. BURBANO, D. F. M.; THEODORO, S. H.; CARVALHO, A. X. M.; RAMOS, C. G. (2022) Crushed vulcanic rock as soil remineralizer: a strategy to overcome the global fertilizer crisis. Natural Resources Research. https://doi.org/10.1007/s11053-022-10107-x
7. BUSATO J, SANTOS L, PAULA A, SODRÉ F, DE OLIVEIRA A, DOBBSS L, MARTINS E, JINDO, K (2022) Can co-application of silicate rock powder and humic-like acids increase nutrient uptake and plant growth in weathered tropical soil? Acta Agriculturae Scandicavica Section B: Soil and Plant Science. 72(1) 716-774 https://doi.org/10.1080/09064710.2022.2078222
8. CANER, L., RADTKE, L. M., VIGNOL-LELARGE, M. L., INDA, A. V., BORTOLUZZI, E. C., MEXIAS, A. S. (2014). Basalt and rhyo-dacite weathering and soil clay formation under subtropical climate in southern Brazil. Geoderma, 235, 100-112. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.024
9. CARVALHO A. M. X. (2012) Rochagem e suas interações no ambiente solo: contribuições para aplicação em agroecossistemas sob manejo agroecológico. Ph.D Thesis, Universidade Federal de Viçosa. 16p. https://locus.ufv.br//handle/123456789/1631
10. CIPRIANO-SILVA, R.; AZEVEDO, A. C. ; SERMARINI, R. A. ; IEDA, J. ; CURY, M. (2017). Chemical attributes of a remineralized Oxisol. Ciencia Rural, 47, p. e20160982, 2017. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160982
11. CORRÊA R. S.; OLIVEIRA C. G. (2024) Classificação dos Remineralizadores Revista do Instituto de Geociências - USP Geol. USP, Sér. cient., São Paulo, 24 (2) p. 23-37. https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v24-222452
12. CRUSCIOL C. A. C., MORETTI L. G., BOSSOLANI J. W., MOREIRA A., MICHERI P. H., ROSSI R. (2019). Can Dunite Promote Physiological Changes, Magnesium Nutrition and Increased Corn Grain Yield? Communications in Soil Science and Plant Analysis, 50(18), 2343-2353. https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1659304

13. CUNHA G. O., ALMEIDA J. A. (2021) Agronomic potential of four rock powders, pure or mixed, as soil remineralizers. Research, Society and Development, 10(17). https://doi.org/10.33448/rsd-v10i17.24828

14. CURTIS J. C. D., LUCCHESE A. V., MASSIO R. F. (2022) Evaluation of microbiological activity, N – NH3, and CO2, losses in poultry litter treated with basalt rock powder. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture. https://doi.org/10.30486/IJROWA.2022.1932913.1270

15. DALMORA A. C.; RAMOS C. G.; OLIVEIRA M. L. S.; TEIXEIRA E. C.; KAUTZMANN R. M.; TAFFAREL S. R.; BRUM I. A. S.; SILVA L. F. O. (2016) Chemical characterization, nano-particle mineralogy and particle size distribution of basalt dust wastes. Science of the Total Environment, 539(1), pp. 560–565. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.141

16. FYFE W. S.; LEONARDOS O. H.; THEODORO, S. H. (2006) Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution. An. Acad. Bras. Ciênc. 78 (4) https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000400077

17. HARDOIM, P. R., MARTINS, E.S., MARTINS, É.S. (2023). Agricultura Sustentável Tropical: casos de sucesso. Informe Agropecuário. Informe Agropecuário, EPAMIG, Remineralizadores e a fertilidade do solo, Belo Horizonte, v.44, n.321, p.79-92. Disponível: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1156764/1/Eder-Agricultura-sustentavel-tropical.pdf

18. KORCHAGIN, J. CARER, L.; BORTOLUZZI, E. C. (2019) Variability of amethyst mining waste: A mineralogical and geochemical approach to evaluate the potential use in agriculture. Journal of Cleaner Production. 210. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.039

19. KORCHAGIN, J., BORTOLUZZI, E. C., MOTERLE, D. F., PETRY, C., CANER, L. (2019). Evidences of soil geochemistry and mineralogy changes caused by eucalyptus rhizosphere. Catena. 175, 132-143. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.001

20. KRONBERG BI, LEONARDOS OH, FYFE W S (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

21. LEFEBVRE, D.; GOGLIO, P.; WILLIAMS, A.; MANNING, D. C.; AZEVEDO, A. C.; BERGMANN, M.; MEERSMANS, J.; SMITH, P. (2019) Assessing the potential of soil carbonation and enhanced weathering through Life Cycle Assessment: a case study for Sao Paulo State, Brazil. Journal of Cleaner Production, 233(2), pp. 468-481. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.099

22. LEONARDOS, O. H.; THEODORO, S. H. (1999) Fertilizer tropical soils for sustainable development. Revista da Academia Brasileira de Ciências. p.143 - 153,

1999

23. LEONARDOS, O. H.; THEODORO, S. H.; ASSAD, M. L. (2000) Remineralization for sustainable agriculture: A tropical perspective from a Brazilian viewpoint. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 56(1) p. 3-9. https://doi.org/10.1023/A:1009855409700
24. LUCHESE A. V., LEITE I. J. G. D. C., GIARETTA A. P. S., ALVES M. A., PIVETTA. L. A., MISSIO R. F. (2023) Use of Quarry Waste Basalt Rock Powder as a Soil Remineralizer to Grow Soybean and Maize'. Heliyon 9(3). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14050
25. LUCHESE, A.V.; PIVETTA, L. A.; BATISTA, M. A.; STEINER, F.; GIARETTA, A. P. S.; CURTIS, J. C. D. 2021. Agronomic feasibility of using basalt powder as soil nutrient remineralizer. African Journal of Agricultural Research, 17, 487-497.
26. 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) p 361-370. https://doi.org/10.1016/0009-2541(87)90143-4
27. MANNING, D. A. C., THEODORO, S. H (2018) Enabling food security through use of local rocks and minerals – The Extrative Industries and Society Journal. https://doi.org/10.1016/j.exis.2018 11.002
28. MARCHI, G., GUELFI-SILVA, D. R., MALAQUIAS, J. V., GUILHERME, L. R. G., SPEHAR, C. R., MARTINS, E. S. (2020). Solubility and availability of micronutrients extracted from silicate agrominerals. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 55, 1-12. DOI: https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.00807
29. MARTINS, É. S.; MARTINS, E. S.; HARDOIM, P. R. (2023). Princípios Geoquímicos, Mineralógicos e Biológicos do Manejo de Remineralizadores de Solos. Informe Agropecuário, EPAMIG, Remineralizadores e a Fertilidade do Solo, Belo Horizonte, Volume 44, No. 321, pp. 26–393. Disponível: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1156783/1/Eder-principios-geoquimicos-mineralogicos.pdf
30. MARTINS É.S, THEODORO S.H., BERNARDEZ F., SIQUEIRA D. S., CAIXETA A. P., CURTIS J. C. D., LUCHESE A. V. (2023) Produção Brasileira de Remineralizadores e Fertilizantes Naturais: 2019 a 2022. Revista Novo Solo. 3. 10-19. Available: https://abrefen.org.br/2023/06/29/producao-brasileirade-remineralizadore-se-fertilizantes-naturais-2019-a-2022/
31. MARTINS É. S, THEODORO S. H., BERNARDEZ F. F. G., LUCHESE A. V., BERGAMANN M., SIQUEIRA D. S., AZEVEDO A., CURTIS J. C. D. (2024) Produção Brasileira de Remineralizadores e Fertilizantes Naturais: 2019 a 2023. Revista Novo Solo. 3.10-19. Available: https://abrefen.org.br/2024/11/08/artigos-produ-

cao-brasileira-de-remineralizadores-e-fertilizantes-naturais-2019-a-2023/

32. MEDEIROS F. P., THEODORO S. H., CARVALHO A. M. X., OLIVEIRA V. S.,. OLIVEIRA L. C, ALMEIDA R. M. P., VIANA M. B., GOMIDE C. S. (2024) The combination of crushed rock and organic matter enhances the capture of inorganic carbon in tropical soils. Journal of South American Earth Sciences. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.105254

33. MEDEIROS, F. P., CARVALHO A. M. X., RAMOS C. G., DOTTO G. L., CARDOSO I. M., THEODORO S. H. (2024) Rock Powder Enhances Soil Nutrition and Coffee Quality in Agroforestry Systems. Sustainability. 16, 354. https://doi.org/10.3390/su16010354

34. MEDEIROS F. P., THEODORO S. H. (2021) Remineralização dos solos para ampliar a produção da palma forrageira na região semiárida. In: SAUER, S., SILVA, A. L. DA, DUARTE L. G. Reflexões sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural. Ed. UnB. 163 – 187. Available: https://doi.org/10.26512/9786558460237

35. NOGUEIRA T. A. R., MIRANDA B. G., JALAL A., LESSA L. G. F., TEIXEIRA Fº M. C. M., MARCANTE N. C., ABREU-JR C. H., JANI A. D., CAPRA G. F., MOREIRA A, MARTINS E. D. (2021) Nepheline Syenite and Phonolite as Alternative Potassium Sources for Maize. 11 (7), 1385. https://doi.org/10.3390/agronomy11071385

36. RAMOS, C. G., HOWER, J. C., BLANCO, E., OLIVEIRA, M. L. S.,THEODORO, S. H. (2022). Possibilities of using silicate rock powder: An overview. Geoscience Frontiers. 13 (1) 101185. ISSN 1674-9871 https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185 .

37. RAMOS, C, G.; HOWER, J. C.; BLANCO, E.; OLIVEIRA, M. L. S., THEODORO, S. H. (2021) Possibilities of using silicate rock powder: An overview. Geoscience Frontiers. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185

38. RAMOS, C. G.; MEDEIROS, D. S.; GOMEZ, L., OLIVEIRA, L.F.S., SCHNEIDER, I.A.H., KAUTZMANN, R.M. (2020) Evaluation of Soil Re-mineralizer from By-Product of Volcanic Rock Mining: Experimental Proof Using Black Oats and Maize Crops. Natural Resources Research, 29(3), pp. 1583-1600. https://doi.org/10.1007/s11053-019-09529-x

39. REIS, B. R., SOARES VASCONCELOS, A. L., MARCOS, A., SILVA, M., ANDREOTE, F. D., AZEVEDO, A. C. (2024). Changes in soil bacterial community structure in a short-term trial with different silicate rock powders. Chemical and Biological Technologies in Agriculture 2024 11:1, 11(1), 1–16. https://doi.org/10.1186/S40538-024-00586-W

40. SANTOS, L. F. dos; SODRÉ, F. F.; MARTINS, É.S.; FIGUEIREDO, C. C.; BUSATO, J. G. (2021) Efeitos de biotita sienito sobre os níveis de nutrientes e cargas elétricas em Latossolo de Cerrado: Effects of finely ground biotite syenite . Pesquisa Agropecuária Tropical. v. 51, p. e66691. Available: https://www.re-

vistas.ufg.br/pat/article/view/66691

41. SOARES G. J., THEODORO S. H., CARVALHO A. X. M., BURBANO D. F. M., RAMOS C. G. 2022. Remineralizadores de suelos y sistemas agroforestales: una opción para la captura de CO2. Revista Agroecología 15 (1). https://doi.org/10.59187/revistaagroecologia.v15i1

42. SOUZA, M. E. ; CARDOSO, I. M. ; CARVALHO, A. M. X. ; LOPES, A. P.; JUCKSCH, I. (2019) . Gneiss and steatite vermicomposted with organic residues: release of nutrients and heavy metals. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agric. 8, p. 1. https://doi.org/10.1007/s40093-019-0244-z

43. SILVA, R. C., GUIMARÃES, C. B, AZEVEDO, A. C., ALVES, M. R., DEMATTÊ, J. A. M., RABÊLO, F. H. S. (2024). Precipitation of amorphous iron and aluminum during the weathering of rock dust in soil columns. Scientia Agricola, 81, e20230219. https://doi.org/10.1590/1678-992X-2023-0219

44. SILVA R. C., FERREIRA E. P., AZEVEDO A. C. (2021). Weathering features of a remineralizer in soil under different land uses. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 56. https://doi.org/10.1590/S1678-3921.PAB2021.V56.01442.

45. SILVA, R.C.; CURY, M.E.; IEDA, J. J. C.; SERMARINI, R. A.; AZEVEDO, A. C. 2017. Chemical atributes of a remineralized oxisol. Ciência Rural, 47. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160982

46. TAVARES L.F., CARVALHO A. M. X., CAMARGO L. G. B., PEREIRA S. G. F., CARDOSO I. M. (2018). Nutrients release from powder phonolite mediated by bioweathering actions. Intern. Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture. 7: 1-10. https://doi.org/10.1007/s40093-018-0194-x

47. TCHOUANKOUE, J. P.; TCHEKAMBOU, A. N. T.; ANGUE, M. A.; NGANSOP, C.; THEODORO, S. H. (2015). Rock Fertilizers as an Alternative to Conventional Fertilizers: The Use of Basalt from the Cameroon Volcanic Line for Maize Farming on Ferralitic Soils. In: Goreau, T., Campe, J. Geotherapy Innovative Methods of Soil Fertility Restoration, Carbon Sequestration, and Reversing CO_2 Increase. 1ª ed. Florida/USA: CRC Press, v.1, 445-458. ISBN: 978-1-4665-9539-2

48. TETCHOU, A. N. T., SONMO, J. D., NGUIFFO, A., TCHOUANKOUE, J. P., NGUETNKAM, J. P., THEODORO, S. H. (2022). Effect of Micaschist Powder in Sugarcane (Saccharum officinarum) Farming on Ferrallitic Soils of Mbandjock (Cameroon, Central Africa). Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 8(4), 16–33. https://doi.org/10.9734/ajsspn/2022/v8i4165

49. THEODORO, S. H., MEDEIROS, F. D. P., CARVALHO, A. M. X. D., OLIVEIRA, V. S., OLIVEIRA, L. C., ALMEIDA, R. M. P., VIANA, M. B., & GOMIDE, C. S. (2026). Rock Dusts: A Silent Revolution for Soil Nutrition and Climate Protection. Sustai-

nability. 18 (10), 4687. https://doi.org/10.3390/su18104687

50. THEODORO S. H., MANNING D. A. C., CARVALHO A. X. M., FERRÃO F. R., ALMEIDA G. R. (2022) Soil remineralizer: a new rote to sustentability for Brazil, a giant exporting agro-mineral commoditites. In: Yakovleva, N. Nickless, E. (eds) Routledge Handbook of the Extractive Industries and Sustainable Development. 1st Ed. 261-281 https://doi.org/10.4324/9781003001317
51. THEODORO S. H., LEONARDOS O. H. (2021) The Unsustainable Sustainability. An. Acad. Bras. Ciênc., 93(1) https://doi.org/10.1590/0001-3765202120181226
52. THEODORO S. H., MEDEIROS F. P., IANNIRUBERTO M., JACOBSON T. K.B. (2021). Soil remineralization and recovery of degraded areas: An experience in the tropical region. J. S. Am. Earth Sci. 103014. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103014
53. THEODORO S. H., SANDER A., BURBANO D. F. M., ALMEIDA G.R. (2021). Rochas basálticas para rejuvenescer solos intemperizados. Revista Liberato, 45-58: 45 https://doi.org/10.31514/rliberato.2021v22n37
54. THEODORO S. H., LEONARDOS O. H. (2015) Stonemeal: principles, potencial and perspective from Brazil. In: Goreau TJ, Larson RW, Campe J. Geotherapy: Innovative methods of soil fertility restoration, carbon sequestration and reversing CO2 increase. CRC Press. USA. 2014. 403-418.
55. THEODORO S. H., LEONARDOS O. H., ROCHA E. L., MACEDO I., REGO K. (2013) Stonemeal of amazon soils with sediments from reservoirs: a case study of remineralization of the Tucuruí degraded land for agroforest reclamation. Acad. Brasil. Ciências. 85 (1) p. 23-34. https://doi.org/10.1590/S0001-37652013000100003
56. THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. (2006) The use of rocks to improve Family agriculture in Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 78(4), pp. 721 - 730. https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000400007
57. THEODORO S. H. (2000) A Fertilização da terra pela Terra: uma alternativa para a sustentabilidade do pequeno produtor rural. 221 p. Ph.D. Universidade de Brasília, DF. Disponível: https://repositorio.unb.br/handle/10482/20881
58. TONELLO, M. S., KORCHAGIN, J., BORTOLUZZI, E. C. (2021). Environmental agate mining impacts and potential use of agate residue in rangeland. Journal of Cleaner Production, 280, 124263. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124263



Brasília-DF, outubro de 2026

ISBN: 978-85-61004-02-6
CBL
9 788561 004026