

Planaltina, DF / Março, 2025

## Remineralizadores do solo

Interação com fontes orgânicas  
pela compostagem tropical



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Cerrados  
Ministério da Agricultura e Pecuária**

ISSN 1517-5111 / e-ISSN 2176-5081

# **Documentos 415**

Março, 2025

## **Remineralizadores do solo Interação com fontes orgânicas pela compostagem tropical**

*Pedro Höfig  
Eder de Souza Martins*

**Embrapa Cerrados  
Planaltina, DF  
2025**

**Embrapa Cerrados**  
BR 020, Km 18, Rod. Brasília / Fortaleza  
Caixa Postal 08223  
73310-970 Planaltina, DF  
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

*Eduardo Alano Vieira*

Secretário-executivo

*Lidiamar Barbosa de Albuquerque*

Membros

*Alessandra de Jesus Boari, Alessandra  
Silva G. Faleiro, Angelo Aparecido  
Barbosa Sussel, Fábio Gelape Faleiro,  
Fabiola de Azevedo Araújo, Giuliano  
Marchi, Jussara Flores de Oliveira  
Arbues, Karina Pulrolnik, Maria Emília  
Borges Alves e Natália Bortoleto  
Athayde Maciel*

Edição executiva e revisão de texto

*Jussara Flores O. Arbues*

Normalização bibliográfica

*Marilaine Schaun Pelufe*

Projeto gráfico

*Leandro Sousa Fazio*

Diagramação

*Wellington Cavalcanti*

Foto da capa

*Pedro Höfig*

Publicação digital: PDF

### **Todos os direitos reservados**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Cerrados

---

Pedro Höfig, Pedro.

Remineralizadores do solo : interação com fontes orgânicas pela compostagem tropical / Pedro Höfig, Éder de Souza Martins. – Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2025.

PDF (62 p.) : il. color – (Documentos / Embrapa, Unidades Centrais, ISSN 1517-5111 / e-ISSN 2176-5081 ; 415).

1. Fertilizantes. 2. Composto orgânico tropical. 3. Agricultura sustentável.  
I. Título. II. Série.

CDD (21. ed.) 668.62

# **Autores**

---

**Pedro Höfig**

Geógrafo, doutor em Ciências Ambientais, diretor da Agropecuária AH, Unaí, MG

**Éder de Souza Martins**

Geólogo, doutor em Geologia, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF



# Apresentação

---

A dependência brasileira por fontes importadas de nutrientes para a agricultura obriga o desenvolvimento de soluções locais e regionais de desenvolvimento de insumos para o manejo da fertilidade do solo. Ao mesmo tempo que contribui para a diminuição da dependência externa, as soluções locais e regionais são ambientalmente mais sustentáveis e mais eficientes em relação ao aproveitamento dos nutrientes, melhorando os solos e a resiliência dos sistemas produtivos.

A compostagem em clima tropical constitui uma destas estratégias regionais que possibilita uma integração eficiente de resíduos orgânicos e minerais. Ao contrário da compostagem clássica, que utiliza a fermentação microbiana para eliminar dois terços dos resíduos, o protocolo da compostagem tropical, mais rápida, preserva mais de dois terços do volume inicial de materiais submetidos ao processo, uma vez que considera esses materiais como produtos para serem utilizados como fertilizantes. Neste sentido, com ingredientes frescos e de qualidade, receita física, química e biologicamente equilibrada e condução adequada do processo, com monitoramento diário de cheiro, umidade e aeração, é possível realizar uma compostagem tropical, mais rápida e controlada, cujo os objetivos são: atingir tempo e temperaturas necessárias à inviabilização dos fitopatógenos, sementes de plantas e substâncias tóxicas presentes nos materiais iniciais; fornecer ao solo substâncias orgânicas diversas, melhoradoras de suas propriedades físico-químicas; facilitar à diversidade de organismos do solo ao fornecer alimentos com sua qualidade preservada e em diferentes graus de decomposição; inocular no solo comunidades microbianas benéficas.

Dessa forma, existe uma sinergia do processo de compostagem com a inserção de remineralizadores, que servem de substrato para os microrganismos. Ao mesmo tempo, a transformação dos remineralizadores é favorecida pelo processo de compostagem, que inocula e já inicia o processo de intemperismo biológico dos minerais, que

continuará seu processo de intemperismo biológico após a sua aplicação ao solo.

Portanto, formas de fontes regionais de nutrientes como os remineralizadores e o composto orgânico tropical apresentam-se como alternativa aos fertilizantes solúveis de síntese química para a agricultura em solos altamente intemperizados, propiciando maior autonomia na produção de alimentos e redução da dependência de insumos externos para as propriedades rurais.

*Sebastião Pedro da Silva Neto*  
Chefe-Geral da Embrapa Cerrados

# Sumário

---

<b>Introdução</b>	9
<b>Remineralizadores de solos</b>	10
<b>Compostagem tropical</b>	22
<b>Compostagem conjunta de materiais orgânicos e remineralizadores</b>	29
<b>Considerações finais</b>	41
<b>Referências</b>	42



## Introdução

---

Em 2023, o Brasil importou cerca de 85% dos fertilizantes utilizados (Anda, 2024), sendo o país agrícola com a maior dependência de importação de commodities fertilizantes (Faostat, 2023). Para adquirir tais produtos, provenientes de fontes finitas (Gliesmann, 2000; Wistinghausen et al., 2000) e que apresentam desvantagens em seu comportamento em relação ao clima e aos solos tropicais (Leonardos et al., 2000), o produtor rural frequentemente se depara com setores concentrados ou oligopolizados (Peres et al., 2010), transformando-se em mero consumidor de insumos agrícolas e serviços técnicos (Cho, 2018).

Sob essa perspectiva, entende-se que a busca por uma agricultura rentável e sustentável passa pela valorização das fontes de nutrientes disponíveis regionalmente, o que confere maior autonomia ao setor rural no tocante à adubação. Destaca-se, assim, a importância da mobilização de recursos locais e regionais adequados às condições tropicais e aos solos com baixa capacidade de retenção de cátions (Feiden, 2001).

A regionalização resulta em menor necessidade de transporte, cadeias de produção mais transparentes, menor dependência dos fluxos internacionais e maior segurança em diversos aspectos. Regionalizar e reinserir a economia na sociedade local contribui para a preservação do meio ambiente, que constitui a base de toda a economia, além de reduzir o desemprego e fortalecer a participação e integração social (Latouche, 2018).

Contrapondo-se a essa lógica está a verticalização da produção convencional, que vincula o agricultor exclusivamente à indústria com a qual está integrado. Essa indústria, por sua vez, opera em mercados distantes, fora de qualquer controle do agricultor. Tal situação enfraquece os laços econômicos do agricultor com seu meio geográfico, levando-o a se isolar do contexto social em que vive (Khatounian, 2001).

Entendem-se como fontes regionais de nutrientes (FRN) os resíduos orgânicos e as fontes minerais, como os remineralizadores, que

se situam na mesma região onde são consumidos e são produzidos em escalas reduzidas em comparação às commodities. As commodities, por sua vez, são produtos de elevado grau de padronização, fabricados e comercializados em grandes quantidades em processos produtivos geralmente contínuos (Gomes-Casseres; Mcquade, 1991). Ao contrário das commodities, que podem ser transportadas entre continentes, as FRN possuem limitações logísticas devido à necessidade de serem aplicadas em grandes quantidades.

As FRN apresentam vantagens em relação às fontes convencionais de nutrientes, tais como a ampla distribuição no território nacional, o baixo custo de produção, a simplicidade do processo produtivo, a diversidade de nutrientes, o efeito residual, a complexidade composicional e o efeito condicionador. Por outro lado, os fertilizantes solúveis de síntese química (FSQ) são, em sua maioria, importados, utilizam combustíveis fósseis para sua produção, possuem poucas variedades de nutrientes e, devido à sua alta solubilidade, apresentam riscos potenciais de contaminação de recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Nesse contexto, este trabalho apresenta um referencial teórico sobre remineralizadores e procedimentos necessários para a realização de compostagem em clima tropical, que ocorre de maneira mais rápida que a compostagem clássica. Ademais, demonstram-se os benefícios da realização de compostagem conjunta de resíduos orgânicos e remineralizadores, entendendo-a como uma ferramenta capaz de fornecer as condições necessárias para a produção de alimentos com maior autonomia e menor dependência de insumos externos.

## Remineralizadores de solos

---

No processo de intemperismo, os minerais primários se decompõem para formar minerais secundários, liberando muitos elementos nutritivos para a biosfera. Parte desses nutrientes é absorvida pelas

plantas, enquanto o restante pode ser inicialmente retido nas superfícies dos minerais argilosos e coloides, mas acaba, progressivamente, sendo perdido por lixiviação. Devido à intensidade desse processo, em climas tropicais o solo torna-se ácido e relativamente infértil ao longo do tempo, caso não receba algum tipo de rejuvenescimento (Chesworth et al., 1989).

A rochagem é uma técnica baseada na premissa de que certos tipos de rochas em pó podem fornecer nutrientes de forma adequada para os solos e, conseqüentemente, para as plantas, aumentando a fertilidade e a disponibilidade mineral em solos pobres e lixiviados. Esse processo já é amplamente conhecido no uso de rochas carbonáticas (calcário agrícola), fosfáticas (fosfatos naturais), sulfáticas (gipsita) e ricas em boro (ulexita) (Martins et al., 2023). O uso regulamentado de rochas silicáticas moídas é mais recente e é denominado remineralização de solos (Martins et al., 2023).

As rochas silicáticas são as mais abundantes na crosta terrestre (Martins et al., 2023; Press et al., 2006). Elas possuem mais de 50% de silicatos em sua constituição e, normalmente, contêm nutrientes vegetais cuja quantidade e disponibilidade variam conforme os minerais presentes nas rochas. Por isso, essas rochas têm sido objeto de estudo para avaliar seu potencial como fontes alternativas para o suprimento nutricional vegetal (Ribeiro et al., 2010). A adição desses remineralizadores aos solos repõe minerais e nutrientes que foram perdidos ao longo dos processos de intemperismo ou por atividades antrópicas (Van Straaten, 2007).

Dada a vasta geodiversidade brasileira, muitos tipos de rochas podem ser utilizados como matérias-primas de remineralizadores de solos. Destacam-se as rochas ultramáficas, ricas em magnésio; as calcissilicáticas, ricas em cálcio; os basaltos, ricos em cálcio e magnésio; as alcalinas, ricas em potássio; e as ultramáficas alcalinas, ricas em cálcio, magnésio e potássio (Martins et al., 2023). Essas rochas são, em geral, constituídas por minerais primários, como olivinas, piroxênios, anfibólios, feldspatos, micas e apatitas, quimicamente formados por compostos de potássio, fósforo, cálcio, magnésio e uma variedade de micronutrientes (Theodoro; Leonardos, 2011).

Os pioneiros Missoux (1853) e Hensel (1898) já recomendavam as rochas moídas como agentes poderosos e escaláveis que compõem um conjunto de soluções regionais essenciais para o manejo sustentável da fertilidade do solo agrícola. Hensel (1898) apontava que, para termos cultivos saudáveis e alimentos que sustentem nossos corpos, seria necessário repor mais do que o nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) nos solos. Segundo ele, não seria preciso esperar milhares de anos para que o frio do inverno, a neve e a chuva desintegrassem o material rochoso e o levassem aos vales; seria fundamental, no entanto, obter rochas moídas adequadas para rejuvenescer o solo desgastado, restituindo-lhe a fertilidade original por meio da remineralização. Em outras palavras, o uso de pós de rochas para melhorar a fertilidade dos solos recria um mecanismo natural, ao simular e acelerar o processo de rejuvenescimento dos solos que ocorre naturalmente por meio de erupções vulcânicas, depósitos glaciais e aluviais (Theodoro, 2020).

No Brasil, os primeiros trabalhos sobre o uso de rochas moídas como remineralizadores e sua influência nos cultivos foram realizados nas décadas de 1950 (Ilchenko; Guimarães, 1953), 1960 (Lima et al., 1969), 1970 (Leonardos et al., 1976) e 1980 (Leonardos et al., 1987). Esses estudos propunham o uso de pó de rocha para melhorar a fertilidade dos solos lateríticos do país, mas enfrentaram resistência devido aos baixos custos e ao fácil acesso a fertilizantes químicos, favorecidos por políticas públicas da Revolução Verde. No final da década de 1990 e início do século XXI, o tema ganhou relevância em razão do aumento dos preços dos fertilizantes e dos impactos ambientais causados pelo uso intensivo de fertilizantes solúveis de síntese química (FSQ) (Theodoro et al., 2021).

A partir do final da década de 1990 e início dos anos 2000, foram apresentadas pesquisas sistemáticas desenvolvidas pela Universidade de Brasília (Theodoro, 2000) e pela Embrapa Cerrados (Resende et al., 2006a). A primeira proposta de desenvolvimento de critérios para regulamentação foi realizada por Martins (2013). Atualmente, algumas rochas silicáticas moídas são classificadas como remineralizadores de solos pela Lei nº 12.890 (Brasil, 2013), que alterou a Lei dos Fertilizantes (Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980).

Para que uma rocha silicática moída seja registrada no Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) como remineralizador, ela deve atender aos critérios estabelecidos pela Instrução Normativa 5/2016 (Brasil, 2016), que regulamenta a Lei nº 12.890:

- 1) Soma de bases – mínimo de 9%.
- 2)  $K_2O$  – mínimo de 1%.
- 3) Quartzo – máximo de 25%.
- 4) Limites máximos de elementos potencialmente tóxicos em ppm (As < 15, Cd < 10, Hg < 0,1, Pb < 200).
- 5) Granulometria em uma das categorias: farelado, pó ou filler.
- 6) Garantia do pH de abrasão, conforme indicado pelo produtor do insumo.
- 7) Apresentação de relatório técnico conclusivo de viabilidade agrônômica, conforme protocolo definido pelo Mapa.

Uma rocha silicática moída que não atenda a todos os requisitos para ser considerada um remineralizador, de acordo com a regulamentação vigente, pode ser registrada como Produto Novo (Brasil, 2018), caso demonstre eficiência agrônômica como insumo mineral (Martins et al., 2024).

O avanço na tecnologia dos remineralizadores pode fortalecer iniciativas adequadas às realidades dos países tropicais, que possuem características agrícolas únicas e uma disponibilidade de recursos naturais distinta das nações desenvolvidas, além de reduzir a dependência externa (Theodoro et al., 2012; Theodoro; Leonardos, 2015). A autossuficiência em fertilizantes é essencial para a segurança alimentar, especialmente em países em desenvolvimento, onde a independência em matérias-primas é vital para garantir a produção local de alimentos (Chesworth et al., 1989). Walan et al. (2014), por exemplo, destacam os problemas futuros de acesso ao fosfato, com a possibilidade de o mundo depender exclusivamente do produto do Marrocos.

Nos países tropicais, que possuem ampla geodiversidade e desempenham um papel importante na geração de alimentos e renda, o uso de pós de rocha é uma alternativa produtiva viável, especialmente porque essas regiões frequentemente são grandes importadoras de insumos químicos (Ramos et al., 2021).

Estudos iniciais no Brasil indicam que as áreas com maior potencial de produção de remineralizadores estão próximas às regiões agrícolas consumidoras (Brasil, 2020). Análises preliminares mostram que a demanda por remineralizadores para o manejo da fertilidade do solo pode ser atendida regionalmente, aumentando a eficiência dos nutrientes nos sistemas produtivos (Martins et al., 2010). No Brasil, a maioria das áreas agrícolas está localizada a menos de 300 km de uma área produtora de remineralizadores, distância considerada adequada para a viabilidade de seu uso (Brasil, 2020). No entanto, essa distância pode variar conforme os preços dos fertilizantes solúveis de síntese química (FSQ) e o conteúdo de nutrientes valiosos, como potássio e fósforo (Theodoro et al., 2022).

As doses de remineralizador aplicadas ao solo devem levar em conta a concentração de nutrientes presentes na rocha, sua mineralogia, o grau de deficiência do solo, a demanda da planta a ser cultivada (Melo et al., 2012; Van Straaten, 2006), as características da planta e do solo, além da granulometria da rocha moída (Winiwater; Blum, 2008). Idealmente, ao menos 80% do material deve passar na peneira de 0,3 mm (Martins et al., 2023). Adicionalmente, a eficiência agrônômica do pó de rocha depende das condições climáticas e da atividade microbiana do solo (Swoboda et al., 2022).

Por exemplo, Marchi et al. (2020) observaram que a solubilidade e a disponibilidade de cobre (Cu), níquel (Ni) e zinco (Zn) dependem dos minerais constituintes dos remineralizadores. Priyono e Gilkes (2004) concluíram que uma granulometria mais fina pode aumentar significativamente a disponibilidade de elementos alcalinos nos remineralizadores. Basaltos e doleritos finamente moídos são eficazes para fornecer cálcio (Ca) e magnésio (Mg), enquanto feldspatos podem ser utilizados como fonte de potássio (K). Wang et al. (2020)

verificaram que quanto mais fino for o gnaiss moído, maior será a liberação de potássio para as plantas.

Zhao et al. (2019) constataram que produtos minerais de silicato de potássio podem substituir parcialmente os FSQ de K em sistemas de rotação de arroz e trigo, além de aumentarem o pH do solo em comparação com áreas que utilizaram cloreto de potássio (KCl). Resende et al. (2006b) analisaram a capacidade de fornecer potássio de três rochas moídas: biotita xisto, brecha alcalina e ultramáfica alcalina. Os resultados indicaram que essas rochas liberam potássio de forma suficiente para atender à demanda de plantas de milho. Da mesma forma, Rodrigues et al. (2021a) aplicaram pós de rochas oriundas das formações Irati e Corumbataí e concluíram que elas podem ser usadas como fontes alternativas e sustentáveis de K, Mg e enxofre (S) para a cana-de-açúcar.

Além de produtividades compatíveis aos FSQ, experimentos com remineralizadores indicam que culturas de ciclo longo apresentam desempenho superior ao obtido com a adubação convencional. Observa-se também o potencial para que o teor de umidade seja maior em solos que recebem remineralizadores, devido à retenção de água pelas argilas. As plantas mostram maior quantidade de massa verde e melhor perfilhamento; as raízes apresentam-se em maior quantidade e são mais desenvolvidas do que as plantas submetidas à adubação convencional. Além disso, os custos são menores quando comparados aos da adubação química, e seu efeito pode se estender por até quatro ou cinco anos consecutivos, graças à liberação gradual dos nutrientes, que ocorre de acordo com a demanda da planta (Melamed et al., 2009; Theodoro; Leonardos, 2011).

Acrescenta-se ainda o aumento do sequestro de carbono no solo pelo processo de remineralização (Beerling et al., 2018; Beerling et al., 2020; Lefebvre et al., 2019; Pratt et al., 2020); o aumento do teor de P no solo, devido à presença desse nutriente na forma de apatita (Luchese et al., 2021); ou o maior aproveitamento do fósforo existente no solo, resultante das interações silício-fósforo, ou ainda pelo efeito indireto do aumento do pH do solo (Alleoni et al., 2019; Carvalho et al., 2001; Cornell; Schwertmann, 1996; Matichenkov;

Bocharnikova, 1996). Além disso, destaca-se o aumento da capacidade de troca de cátions pela formação de argilominerais 2:1 (Krahl et al., 2020; Martins et al., 2010; Tarumoto, 2019; Silva et al., 2017; Toscani; Campos, 2017) e de fases de baixa cristalinidade (Silva et al., 2021), a contribuição para a resiliência do sistema produtivo e a melhoria na qualidade nutricional dos alimentos produzidos (Theodoro; Leonardos, 2015).

Burbano et al. (2022) confirmam a relação direta entre o conteúdo nutricional da cultura da quinoa e o uso de diferentes insumos, mostrando que as plantas cultivadas com remineralizadores apresentam maiores quantidades de K, Ca, Mn e boro (B), em comparação às plantas de solos adubados com NPK. Desde a década de 1930, Howard (2007) relacionava a agilidade, resistência e temperamento alegre do povo Hunza com sua agricultura, que recebia aplicações anuais de pó de rocha produzido pelo degelo nas montanhas vizinhas, ainda que o autor ressalte a necessidade de mais pesquisas sobre o tema. Cho (2018) aponta que uma maçã da década de 1950 equivale, atualmente, do ponto de vista nutricional, a 32 maçãs, devido à não reposição dos elementos lixiviados dos solos.

Além disso, Santos et al. (2021a) apontaram que o silício, presente em grandes quantidades nos remineralizadores, é considerado um elemento benéfico, por estar relacionado ao aumento na capacidade fotossintética, à resistência ao acamamento, à redução da taxa transpiratória e ao estímulo da resistência das plantas a pragas e doenças. Pozza et al. (2015) relataram que o silício (Si) pode contribuir para o manejo integrado de pragas e doenças, mas destacaram a importância da granulometria do produto aplicado.

Dalmora et al. (2020) demonstraram que a aplicação de andesito e dacito moídos pode substituir parcialmente os FSQ, devido às altas taxas de dissolução de seus minerais. O dacito mostrou-se mais eficaz para o fornecimento de potássio, enquanto o andesito foi mais eficiente no fornecimento de cálcio. Dias et al. (2018) constataram que a adubação potássica para o cafeeiro, com siltito glauconítico, aumentou a fertilidade do solo, corrigindo a acidez e elevando os teores de K, P, Ca, a capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva

e os níveis de Zn e ferro (Fe) no solo. Ademais, a adubação com 336 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, derivado desse agromineral silicático, em dose única, proporcionou produções de grãos semelhantes às da fertilização com 618 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O de KCl, aplicada de forma parcelada, além de melhorar a análise sensorial da bebida.

Rudmin et al. (2019) identificaram benefícios no uso de silito glauconítico no solo, com aumento significativo no rendimento de grãos de trigo. O uso desse remineralizador elevou as concentrações de carbono orgânico, nitratos, amônio trocável, K, P, Ca e Mg, além de aumentar o pH do solo de 6,0 para 6,7. Enquanto o efeito do calcário se deve à reação dos carbonatos de cálcio e magnésio que o compõem, o remineralizador promove o aumento do pH por meio do consumo de H<sup>+</sup> na reação de intemperismo dos silicatos, com liberação de bases, e também pela reação do alumínio trocável com o íon silicato (Crusciol et al., 2017). Espera-se um efeito mais rápido quando há maiores quantidades de silicatos de Ca, seguidos pelos de Mg, Na e K (Anda et al., 2015).

De forma semelhante, Priyono et al. (2009), em estudo com rochas silicatadas originadas de vulcões na Indonésia, concluíram que o uso desses agrominerais silicáticos aumentou a quantidade de nutrientes vegetais extraíveis e a atividade dos microrganismos do solo, além de corrigir a acidez. Martinazzo et al. (2020), ao analisarem um banco de dados de rochas que abrange a região Centro-Sul do Brasil, observaram que a maioria das rochas não apresenta concentrações limitantes de metais pesados e que, além de Ca, Mg e K, os remineralizadores podem fornecer micronutrientes a longo prazo. Almeida et al. (2018) relataram um aumento na disponibilidade de fósforo em mudas de café com a aplicação de remineralizador oriundo de silito glauconítico.

Outrossim, Rodrigues et al. (2021b) avaliaram, em estufa, o uso de coprodutos da mineração de calcário da Formação Irati e encontraram benefícios como o aumento do pH do solo, do teor de potássio, do fósforo disponível e da produção de massa seca dos brotos de milho. Em outra pesquisa, biotita-sienito moído foi capaz de elevar os teores de P e K, melhorar a absorção de N e K pelo milho e aumentar

as cargas permanentes do solo, favorecendo o crescimento das plantas (Santos et al., 2021b).

Assim, os remineralizadores caracterizam-se essencialmente pela formação de novas fases minerais, contribuição na correção da acidez do solo e fornecimento de nutrientes (Martins et al., 2023). No entanto, mesmo considerando a possibilidade de mobilização de recursos locais e regionais, adequados às condições tropicais e aos solos com baixa capacidade de retenção de cátions, 85% do total de fertilizantes consumidos no país ainda é derivado de fontes importadas convencionais de nutrientes, compostas essencialmente de variantes de NPK (Anda, 2024), de alta concentração e elevada solubilidade (Rodrigues, 2009).

O principal questionamento sobre a eficiência dos remineralizadores está relacionado à sua baixa solubilidade em água (Motta Junior et al., 2021). Apesar de serem fontes multinutrientes de liberação gradual (Carvalho, 2013), mais adequadas às condições tropicais e capazes de fornecer nutrientes conforme as necessidades de cada fase dos cultivos, reduzindo perdas por lixiviação (Jimenez-Gómez, 1992; Manning; Theodoro, 2020), a questão da solubilidade deve ser contextualizada. A disponibilidade dos nutrientes depende da composição química, dos minerais constituintes, do tamanho das partículas do produto (Hensel, 1898; Fyfe et al., 2006) e da intensidade biológica do sistema agrícola (Ferreira et al., 2023).

Teixeira et al. (2008) apresentaram a seguinte ordem crescente de estabilidade dos minerais: halita, calcita, olivina, anortita, piroxênios, anfibólios, albita, biotita, ortoclásio, muscovita, argilominerais, quartzo, gibbsita e hematita. Em resumo, com granulometria inferior a 0,3 mm, os minerais ricos em cálcio e/ou magnésio (corretivos) e os feldspatoides (fontes de K) apresentam alta reatividade química e biológica. Por sua vez, a biotita, a flogopita (fontes de K e CTC), a glauconita (fonte de K), a apatita (fonte de P e corretivo), as zeólitas e os argilominerais 2:1 (fontes de CTC) demonstram alta reatividade biológica. Já com granulometria inferior a 0,075 mm, o feldspato potássico, a muscovita e a illita (fontes de K) apresentam baixa reatividade biológica (Martins et al., 2023).

Por exemplo, os nutrientes contidos em minerais do tipo andesina, labradorita, augita, anortita, anfibólio, piroxênio e olivina reagem já no primeiro ciclo da cultura na interação solo-água, enquanto a biotita, clorita e apatita necessitam da interação solo-água-planta. Já o ortoclásio reage a partir do segundo ciclo da cultura na interação solo-água-planta, ao passo que o quartzo, a ilmenita e a magnetita são considerados estáveis na escala de tempo humana (Tardy; Duplay, 1992; Wieland et al., 1988). O feldspato potássico e a muscovita podem ser considerados como reservas minerais a longo prazo, sendo o primeiro de liberação lenta (Badr, 2006) e o segundo, de liberação muito lenta (Song; Huang, 1998). A flogopita e a biotita liberam o potássio na escala de tempo agrônômica (Duarte et al., 2012; Curi et al., 2005; Resende et al., 2006), mas dependem da ação biológica para a sua eficiência (Krahl et al., 2022).

Portanto, a liberação também depende das formas mineralógicas em que os nutrientes se encontram no remineralizador. Embora possam ocorrer menores quantidades na forma de carbonatos, a presença de silicatos de cálcio, como andesina, labradorita e augita, é frequente e, conseqüentemente, tende a ser o principal responsável pelo cálcio liberado no solo. Dentro dos materiais silicatados, os silicatos de cálcio são caracterizados como mais reativos, já que o Ca apresenta ligações mais fracas com o Si em comparação ao Mg e ao K (Kelland et al., 2020; Anda et al., 2015). Já Swoboda et al. (2022) demonstram resultados positivos e indiferentes quanto à liberação de Ca, Mg e K presentes nas rochas moídas, dependendo do contexto. Lepsch (2011) aponta que, em geral, os minerais que possuem cálcio e magnésio em sua composição são menos estáveis. Kämpf et al. (2009) afirmam que as micas são os minerais com K mais comuns nos solos. Em seu processo de intemperismo, o K<sup>+</sup> é liberado, transformando-as em vermiculita e esmectita. Entre as micas, a velocidade e intensidade de transformação e liberação de potássio são maiores na biotita e muito menores na muscovita e illita (Mackintosh; Lewis, 1968). Por isso, estas estão mais presentes no solo e, aquela, nas rochas. A transformação de biotita em vermiculita pela ação de plantas atuando na absorção de K foi demonstrada por Mortland et al. (1956).

Kämpf et al. (2009) também mencionam que silicatos primários, com exceção da muscovita e do quartzo, podem intemperizar rapidamente quando há elevada disponibilidade de água, como, por exemplo, no caso da apatita, olivina, anfibólios, piroxênios, biotita, glauconita, clorita, albita, plagioclásios e microclínio. Os argilominerais secundários intemperizam lentamente, enquanto a caulinita, gibbsita e os óxidos são resistentes à intemperização, pois, normalmente, já são produtos finais de intemperismo em solos tropicais.

Além disso, as plantas podem também usar nutrientes em formas pouco solúveis presentes no solo, desde que haja vitalidade na interação planta-solo (Scheller, 2000). Ainda que os nutrientes das rochas moídas possam ser pouco solúveis, eles podem ser biodisponíveis, uma vez que os nutrientes podem ser liberados dos minerais e absorvidos por microrganismos do solo e por plantas. Assim, fertilizantes de proveniência geológica local devem ser usados em conjunto com medidas biológicas (Chesworth et al., 1989; Pinheiro, 2018; Tavares, 2017). É essencial que sejam utilizadas práticas que mantenham e/ou aumentem a vida no solo, pois, na ausência de vida, toda a riqueza de minerais contida no solo seria inacessível aos vegetais (Koepf et al., 1983).

Neste sentido, Krahl et al. (2022) demonstram que o processo de intemperismo da mica biotita, com a ação das raízes de milho, forma minerais novos desde os primeiros 45 dias, aumentando a CTC e liberando nutrientes, os quais são acumulados no tecido vegetal. O processo biológico dos sistemas agrícolas precisa ser intensivo para que ocorra o processo de biointemperismo em um prazo útil para a produção agrícola. O uso de remineralizadores em solos biologicamente pobres, compactados e sem cobertura de palha geralmente demorará mais para apresentar efeitos agronômicos significativos. O funcionamento biológico dos solos tratados com agrominerais silicáticos é uma variável determinante para sua eficiência.

Dessa forma, não faz sentido avaliar a solubilidade em água desses produtos. É importante lembrar que o pH de abrasão é um mecanismo revelador do potencial de dissolução dos remineralizadores em água no curto prazo, conforme descrito por Portilho e Leonardos

(1976). Ele indica a presença de silicatos compostos por bases e o efeito da moagem. Quanto mais fino for o produto, maior será o pH de abrasão até o limite máximo da hidrólise dos minerais (Grant, 1969). Dias et al. (2013) mostraram que os remineralizadores apresentam solubilidade em água muito baixa e que apenas o processo de acidez do solo e o processo biológico do sistema produtivo associados às raízes das plantas permitem uma dissolução mais ampla dos remineralizadores e de todos os seus efeitos benéficos.

Outros trabalhos demonstram a importância da vida no solo para a disponibilização dos nutrientes. Hinsinger et al. (1993) demonstraram a capacidade das raízes de canola para promover a transformação e dissolução de mica do tipo flogopita na rizosfera. No mesmo sentido, Hinsinger et al. (2001) demonstraram que, em condições laboratoriais, diversas espécies vegetais provocaram aumento na liberação de Si, Ca, Mg e sódio (Na), oriundos de pó de basalto, sendo entendido como um processo de curto prazo.

Já Manning (2018) indicou em seu estudo que o intemperismo de silicatos de potássio, mediados por comunidades microbianas do solo, ocorre de forma suficientemente rápida para fornecer nutrientes às plantas em crescimento. Martins et al. (2014) apontam que o biointemperismo promovido pela rizosfera da cultura é o processo central para a disponibilidade dos agrominerais nos sistemas agrícolas. Semelhantemente, Wu et al. (2021) verificaram que as atividades radiculares aceleram o intemperismo de minerais similares à biotita. Setiawat e Mutmainnah (2016) estudaram os microrganismos solubilizadores de potássio isolados da rizosfera da cana-de-açúcar e consideraram que eles são capazes de solubilizar o K a partir de uma fonte pouco solúvel do nutriente.

Sendo assim, a adoção de rotas que incluem os remineralizadores configura-se como uma estratégia importante para assegurar e manter o papel de destaque 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. Seu funcionamento, todavia, parte do pressuposto do biointemperismo das rochas, sendo essenciais, portanto, estratégias que mantenham os agroecossistemas com atividade biológica funcional e elevada.

## Compostagem tropical

---

A decomposição de materiais orgânicos ocorre espontaneamente na natureza, mas, com maior influência das variações dos fatores ambientais, sua estabilização é protelada (Berton et al., 2021). Ao realizar a compostagem, o ser humano assume o papel de direcionador dos processos naturais, fornecendo condições físicas e químicas ideais aos microrganismos responsáveis pela transformação das matérias-primas orgânicas, acelerando sua decomposição (Cooper et al., 2010). No Brasil, os métodos mais usados são a compostagem em pilhas ou em leiras, com aeração natural ou forçada, podendo ser estáticas ou movimentadas no pátio de compostagem (Berton et al., 2021), adaptáveis às distintas realidades de infraestrutura e matérias-primas.

Em um processo de compostagem clássico, a temperatura varia de acordo com quatro fases principais: fase mesofílica inicial, fase termofílica, fase mesofílica de resfriamento e maturação. Na fase mesofílica inicial da compostagem, com duração entre um e sete dias e temperaturas entre 30 e 45 °C, exige-se alta necessidade de revolvimento, ocorre a expansão das colônias de microrganismos mesófilos, intensificação da ação de decomposição, liberação de calor, elevação rápida da temperatura, formação de ácidos orgânicos e queda de pH. Na fase termofílica, que dura entre 12 e 16 dias e é caracterizada por temperaturas acima de 45 °C, ocorre intensa decomposição do material, aumento do pH e domínio de bactérias. Com a maior parte do material orgânico degradado, na fase mesofílica de resfriamento, que leva de 15 a 20 dias, ocorre a degradação de substâncias orgânicas mais resistentes, redução de carbono e da atividade microbiana, com consequente queda de temperatura da leira e perda de umidade, com o domínio de bactérias, fungos e actinomicetos, estando o composto já bioestabilizado ou semicurado. Por fim, na maturação, com a atividade biológica baixa, ocorre a formação de substâncias húmicas e mineralização da matéria orgânica, e o composto perde a capacidade de autoaquecimento, apresentando a temperatura ambiente, com o

fertilizante já entendido como curado. Esta fase persiste entre 15 e 60 dias (Inácio; Miller, 2009).

Em alguns locais no Brasil, porém, tem-se terminado o manejo da compostagem antes da fase de maturação, o que tem sido denominado compostagem tropical (Teixeira, 2024). Com o fim da fase termofílica, considera-se que o composto está estabilizado, porém não maturado ou humificado (Berton et al., 2021). Segundo Epstein (1997), a estabilização é um estágio de decomposição da matéria orgânica com influência da atividade biológica, enquanto a maturação é uma condição organoquímica do composto que indica a presença ou ausência de ácidos orgânicos tóxicos e a presença de moléculas húmicas ou que estão sendo humificadas.

Entretanto, em clima tropical, o efeito da matéria orgânica não humificada é muito importante, uma vez que ocorrem etapas no processo de decomposição que melhoram a estrutura do solo e que são eliminadas durante o processo de compostagem clássico, padrão para o hemisfério norte. O que se quer não é apenas nutrir a planta com NPK orgânico, mas, além disso, fornecer alimentos para os organismos do solo, de forma que seja promovida uma melhor agregação do solo, criando poros por onde devem entrar ar e água (Primavesi, 2021). Magalhães et al. (2021), por exemplo, consideraram o composto feito com resíduos da agroindústria do palmito pronto com 45 dias, porque as moléculas mais facilmente biodegradáveis que ainda existem são mineralizadas pelos microrganismos do solo de forma rápida em clima tropical (Silva, 2019). Höfig et al. (2022), em compostagem mecanizada com intenso controle ambiental da massa, também utilizaram a mesma estratégia, visando a diminuição do tempo de execução da compostagem e da perda de N e C, o aumento do rendimento em toneladas de matéria seca do produto final, o maior efeito pré e pró-biótico e maior qualidade da fermentação.

Ao contrário da compostagem clássica, que foi pensada para utilizar a fermentação microbiana para eliminar dois terços dos resíduos, o protocolo da compostagem tropical preserva mais de dois terços do volume inicial de materiais submetidos ao processo, já que entende esses materiais como produto. Neste sentido, com ingredientes

frescos e de qualidade, receita física, química e biologicamente equilibrada e condução adequada do processo, com monitoramento diário de cheiro, umidade e aeração, é possível realizar uma compostagem tropical mais rápida e controlada. Isso gera no interior da massa condições adequadas à multiplicação de comunidades microbianas, responsáveis por uma fermentação aeróbica de qualidade superior, cujos objetivos são: atingir o tempo e as temperaturas necessárias à inviabilização dos fitopatógenos, sementes de plantas e substâncias tóxicas presentes nos materiais iniciais; fornecer ao solo substâncias orgânicas diversas, que melhoram suas propriedades físico-químicas; facilitar à diversidade de organismos do solo a digestão dos alimentos, ao fornecê-los com sua qualidade preservada e em diferentes graus de decomposição; e inocular no solo, de forma abundante, comunidades microbianas benéficas (Teixeira, 2024).

A eficiência do processo de compostagem está diretamente relacionada a fatores que proporcionam condições ótimas para que os microrganismos aeróbios possam se multiplicar e atuar na transformação da matéria orgânica. O conjunto de fatores condicionantes para o bom desenvolvimento de um sistema biologicamente complexo como a compostagem deve ser balizado por uma série de parâmetros, sendo eles uma combinação ótima de umidade, aeração, temperatura, pH, relação C:N, granulometria e dimensões da leira (Valente et al., 2009). Isto é, os microrganismos precisam de compostos de carbono como fonte de energia, nitrogênio para produção de suas proteínas e oxigênio e água em proporções ideais para sua sobrevivência, fatores influenciados pela granulometria do material e pela altura e largura da leira. Todavia, embora se busquem as condições ótimas de compostagem, são necessárias, ainda, bases científicas que as expliquem, pois se trata de um processo ecológico complexo (Kiehl, 2004).

A relação C:N é um índice utilizado para avaliar a composição e os níveis de maturação de substâncias orgânicas e seus efeitos no crescimento microbiológico, já que a atividade dos microrganismos heterotróficos envolvidos no processo depende tanto do conteúdo de C para fonte de energia quanto de N para síntese de proteínas (Sharma et al., 1997), reprodução e crescimento celular (Suszec, 2005).

O valor ideal deste parâmetro para iniciar o processo de compostagem está entre 25:1 e 35:1 (Fong et al., 1999), para que o processo de imobilização de N predomine em relação à mineralização deste nutriente (Chen et al., 2014; Moreira; Siqueira, 2006). Relações muito baixas causam perdas praticamente inevitáveis de nitrogênio na forma de amônia, enquanto os valores mais altos tornam o processo mais prolongado (Cotta et al., 2015). Na prática, contudo, estudos realizados com diferentes fontes de resíduos apresentam uma grande variação na relação C:N inicial, de 5:1 até 513:1, indicando ser possível a ocorrência da compostagem mesmo em valores fora da faixa de relação ótima. A proporção idealizada entre 25:1 e 35:1 reconhecidamente caracteriza a melhor condição para a evolução do processo, mas se, por exemplo, parte do carbono disponível é de difícil degradação (celulose, hemicelulose e lignina), é aconselhável que a relação C:N inicial seja maior, pois o carbono biodisponível é inferior ao carbono total mensurado (Dal Bosco et al., 2017).

Durante o processo de compostagem, verifica-se uma redução da relação C:N em decorrência da oxidação e do consumo, como fonte de energia, da matéria orgânica pelos microrganismos, que liberam CO<sub>2</sub> através da sua respiração e do calor (Zhang; He, 2006), diminuindo assim a concentração de C, já que sua demanda é maior que a de N (Valente et al., 2009). A compostagem ideal é terminada com relação C:N menor que 15, para fornecer grandes quantidades de nutrientes para as culturas subsequentes (Haynes, 1986), uma vez que, quando os processos de mineralização predominam em relação aos de imobilização, a matéria orgânica funciona como fonte de nutrientes, aumentando a disponibilidade destes às plantas (Paul; Clark, 2007). Já Rasapoor et al. (2016) indicam que um composto está maturado com a relação C:N menor ou igual a 20. Isto é, a matéria orgânica estabilizada é caracterizada, de modo geral, pelo fato de apresentar uma relação C:N que indica que o processo de mineralização do nitrogênio prevalece sobre a sua imobilização (Silva et al., 2013). Se essa proporção não estiver adequada e houver excesso de carbono, haverá falta de nitrogênio, o que resulta na retirada deste elemento do solo (Cotta et al., 2015).

No processo de decomposição da matéria orgânica, a umidade ideal para a compostagem, entre 50 e 60%, garante a atividade microbiana (Rodrigues et al., 2006). Materiais com menos de 30% de umidade inibem a vida, sendo que um meio com umidade acima de 65% proporciona uma decomposição lenta, condições de anaerobiose e lixiviação de nutrientes (Rici; Neves, 2004). Um teste rápido para se conhecer a umidade da leira consiste em apertar o composto com as mãos. Se o composto soltar água como uma esponja que já foi espremida antes, ele se encontra com o teor adequado de umidade (Penteado, 2010).

A aeração é classificada como o principal mecanismo capaz de evitar altas temperaturas durante o processo de compostagem, de aumentar a velocidade de oxidação, de diminuir a liberação de odores, de reduzir o excesso de umidade de um material em decomposição (Pereira-Neto, 1996) e de expor as camadas externas às temperaturas mais elevadas (Fernandes; Silva, 1999). O oxigênio é de vital importância para os microrganismos que realizam a decomposição dos resíduos orgânicos, já que a decomposição é um processo de oxidação biológica das moléculas ricas em carbono, com liberação de energia. Essa energia, então, é consumida pelos organismos (Peixoto, 1988). A quantidade necessária de oxigênio para a compostagem depende do estágio em que ela se encontra. Nas primeiras etapas, de rápida degradação, verifica-se uma grande necessidade de aeração para a realização adequada do processo. Já nas etapas finais, com a redução da atividade microbiana, condições menos oxidativas são mais adequadas, pois a necessidade de oxigênio é menor (Andreoli, 2001).

Massukado (2008) afirma que os revolvimentos da leira de compostagem devem ser realizados obrigatoriamente em algumas situações: quando a temperatura estiver acima de 70 °C, a umidade estiver acima de 60%, ou quando houver presença de moscas e maus odores. Kiehl (2004) ressalta que, mesmo em condições de aparente normalidade, é indicado realizar o revolvimento se este não tiver sido feito por um longo período, a fim de introduzir ar rico em oxigênio e liberar o ar saturado de gás carbônico. Pereira-Neto (2007) afirma que

a frequência recomendada de revolvimentos é de aproximadamente duas vezes por semana, mas alerta que a realização excessiva de revolvimentos pode afetar negativamente a dinâmica do nitrogênio no composto.

A temperatura é um fator de grande relevância no processo de transformação da matéria orgânica, sendo facilmente mensurável e indicando diretamente a eficiência da oxidação da matéria. Na fase termofílica da compostagem, há a proliferação de microrganismos exotérmicos, que promovem o aumento da temperatura da leira, o que é essencial para a eliminação de patógenos e sementes de plantas daninhas. A temperatura desejável deve variar entre 60 e 70 °C nos primeiros 25 dias de compostagem. Posteriormente, durante o período de maturação, a temperatura tende a diminuir (Orrico Júnior et al., 2009). Os microrganismos patogênicos e as sementes infestantes são destruídos em curto período com temperaturas acima de 55 °C (Misra et al., 2003). Brasil (2017) aponta a necessidade de 14 dias com temperatura superior a 55 °C ou 3 dias com temperatura superior a 65 °C.

A granulometria dos materiais influencia diretamente a dinâmica do processo de compostagem. A decomposição da matéria orgânica é um fenômeno microbiológico cuja intensidade está relacionada à área superficial específica do material a ser compostado. Quanto menor a granulometria das partículas, maior será a área superficial disponível para ser atacada e digerida pelos microrganismos, acelerando o processo de decomposição (Kiehl, 1985; Liu et al., 2018). A granulometria ideal para compostagem é de resíduos com dimensões entre 1 e 5 cm, uma vez que partículas menores podem ser facilmente compactadas e encharcadas, dificultando a aeração, enquanto partículas maiores podem prolongar o tempo de decomposição (Magalhães et al., 2021).

O correto dimensionamento das leiras também é crucial para o processo de compostagem. A leira deve ter tamanho suficiente para evitar a rápida dissipação de calor e umidade, ao mesmo tempo em que deve permitir boa circulação de ar (Rodrigues et al., 2006). A altura da leira deve estar entre 1,5 e 1,8 m, e a largura, entre 1,2 e

1,8 m (Kiehl, 2004). Pilhas muito altas podem compactar as camadas inferiores, enquanto pilhas baixas perdem calor com mais facilidade (Cooper et al., 2010). Em relação ao terreno, as leiras devem ser localizadas em áreas com pouca declividade (até 5%), mas não em terrenos planos, para facilitar o manejo da pilha e permitir a drenagem da água da chuva (Rici; Neves, 2004).

Após o processo de compostagem, os sólidos biodegradáveis da matéria orgânica são convertidos em um estado estável, podendo ser manejados, estocados e utilizados como adubo orgânico, sem causar efeitos nocivos ao ambiente (Orrico et al., 2007). O composto maduro tem um odor leve, características bem diferentes do material de origem (Cantú et al., 2022), e maior facilidade de aplicação. Diferente do esterco fresco, o composto maduro e minerais de ação lenta, como pós de rochas, dificilmente são superdosados (Koepp et al., 1983). De modo geral, considera-se que 50% do N, 60% do P e 100% do K presentes no composto são liberados no primeiro ano de cultivo (Berton et al., 2021).

Pereira-Neto (2007) indica que o composto está pronto quando não ocorre perda de água, apresenta cor escura, está solto e com cheiro de terra. Segundo a Instrução Normativa 61, de 8 de julho de 2020, do Ministério da Agricultura e Pecuária, para comercializar compostos orgânicos sólidos como fertilizantes, o produto deve atender aos seguintes critérios de qualidade: umidade < 50%, nitrogênio total > 0,5%, carbono orgânico > 15% e relação C:N máxima de 20 (MAPA, 2020). Tiquia e Tan (1998) afirmam que o composto é considerado fitotóxico quando o índice de germinação de sementes é inferior a 80% em comparação com o controle sem o uso do composto.

Valente et al. (2009) afirmam que a aproximação da temperatura do composto à temperatura ambiente é um indicativo de equilíbrio microbiológico, mas não pode ser utilizada como único parâmetro para verificar a maturidade do composto. Kiehl (2004) argumenta que o pH neutro ou quase neutro do composto revela que ele está estabilizado; quando alcalino, o composto está em processo de humificação. Berton et al. (2021) defendem que uma relação C:N próxima de 18 indica um fertilizante semicurado e, entre 10 e 18, um produto curado. Se

a relação C:N estiver abaixo de 10, pode ocorrer perda de nitrogênio amoniacal. O tempo necessário para a finalização da compostagem depende de vários fatores: quanto mais próximas do ideal forem as condições de temperatura e umidade, mais rápido será o processo. Se os materiais forem de pequenas dimensões, a umidade for adequada e a pilha for revolvida semanalmente, o composto será estabilizado em 30 a 60 dias e curado entre 90 e 120 dias. Na compostagem tropical, o composto é considerado pronto quando está estabilizado.

Parte do composto orgânico pode, no entanto, ter origem mineral. O uso de rochas moídas pode aumentar a atividade biológica no processo de compostagem, promovendo a solubilização dos minerais nas rochas, o que aumenta o potencial agrônômico do adubo (Tavares et al., 2018).

## Compostagem conjunta de materiais orgânicos e remineralizadores

---

Embora a compostagem conjunta de pós de rochas e materiais orgânicos seja benéfica para o beneficiamento biológico dos remineralizadores e para a qualidade final do composto orgânico (Ishimura et al., 2006; Theodoro, 2020), a literatura aponta que a maioria dos estudos trata a aplicação de compostos ou materiais orgânicos e remineralizadores como produtos separados, ainda que aplicados de forma concomitante (Bamberg et al., 2023; Basak et al., 2021; Campbell, 2009; Haller, 2011; Jones et al., 2009; Li et al., 2020; O'brien et al., 1999; Rocha, 2006; Swoboda et al., 2022, 2016; Tavares et al., 2018; Theodoro et al., 2012). Teixeira (2024) destaca que há sinergia entre o composto tropical e os remineralizadores. O composto atua como uma ferramenta para proteger, alimentar e aumentar a vida no solo, criando as condições necessárias para que os remineralizadores liberem gradualmente uma gama de nutrientes.

Theodoro et al. (2020) concluíram em sua pesquisa que o uso combinado de remineralizadores e compostos orgânicos mostrou-se uma tecnologia adequada e sustentável. Nesse contexto, em muitos casos, os remineralizadores são misturados aos compostos orgânicos, e a liberação dos nutrientes pode ser acelerada por meio de mecanismos físico-biológicos controlados (Theodoro, 2020), como a compostagem. Pettersen Neto (2010) sugere a aplicação de remineralizadores incorporados ao composto orgânico.

A adição de rochas moídas no processo de compostagem representa uma forma de beneficiamento biológico do remineralizador e de estímulo à vida microbiana na compostagem. Os microrganismos presentes no composto encontram matéria-prima para sua atividade e, por meio dos ácidos húmicos, aceleram a quebra dos compostos químicos presentes, especialmente nos argilominerais. Ao mesmo tempo, o pó de rocha aumenta a atividade da compostagem, estimulando a biota (Pinheiro, 2021).

Alguns estudos investigam como o uso de rochas moídas impacta o processo de compostagem. Sikora (2004) não encontrou benefícios nas fases iniciais da compostagem, observando apenas pequenos aumentos na temperatura do composto durante a fase de maturação com o uso de pó de basalto e esterco bovino. Já Graham (2001) e Szmidt (2004) constataram aumentos significativos na temperatura da leira de compostagem quando utilizaram uma mistura de basalto moído, glacial silt (sedimento fino de origem glacial) e carcaças de aves. Além disso, esses autores observaram a diminuição dos teores de amônia e uma maior retenção de nitrogênio nos compostos com pó de rocha.

Taverne (2017) realizou diversos testes adicionando minerais como montmorilonita, caulinita e goethita na compostagem com matéria orgânica fresca, observando que a adição de minerais induziu uma redução de até 12% nas emissões de carbono. Embora a adição de minerais tenha sido eficaz para reduzir a mineralização do carbono e estabilizar o carbono durante a compostagem, esses compostos não aumentaram o armazenamento de carbono no solo a curto prazo.

Por outro lado, ao comparar um sistema de adubação convencional com um sistema alternativo baseado em compostos orgânicos

com remineralizadores em uma lavoura de café arábica em Unaí, MG, Höfig et al. (2024) obtiveram a mesma produtividade, mas com melhor qualidade da bebida para o sistema de adubação alternativo (Tabela 1).

**Tabela 1.** Sistemas de adubações utilizados ao longo do experimento.

Adubação	Sistema	
	Fonte convencional de nutriente	Fonte regional de nutriente
Plantio	470 g superfosfato simples/cova.	2 kg de composto do plantio/cova.
	55 g de cloreto de potássio/planta.	175 g de fosfato natural/planta.
	53 g de ureia/planta.	350 g de composto/planta.
	350 g de composto do plantio/planta.	700 g de calcixisto/planta.
	700 g de calcixisto/planta.	
Pós-plantio	23 g de ureia/planta.	1 kg de composto do primeiro ano/planta.
Colheita	90 g superfosfato simples/planta.	4,8 kg de composto de primeira colheita/planta.
	88 g de cloreto de potássio/planta.	
	165 g de ureia/planta.	

Fonte: Höfig et al. (2024).

Nessa mesma área de estudo, Höfig (2023a), por meio da Análise do Ciclo de Vida, constatou que as estimativas de emissões de gases de efeito estufa preveem que o sistema com fontes convencionais de nutrientes supera as emissões do sistema com FRN em 76,9%, com 15.524,4 kg/ha de dióxido de carbono equivalente no sistema convencional e 8.775,6 kg/ha de dióxido de carbono equivalente no sistema

com FRN. A diferença no desempenho ambiental entre os sistemas deve-se, principalmente, ao uso de composto orgânico com remineralizador, que é produzido a partir de resíduos da própria fazenda e fontes regionais de nutrientes, em substituição aos fertilizantes químicos. Para uma produção média projetada de 2.100 kg/ha de café, as emissões de dióxido de carbono equivalente são de 2,46 e 1,39 kg/ha de dióxido de carbono equivalente de café beneficiado para os sistemas convencional e com FRN, respectivamente. Azevedo (2023) destaca que o intemperismo consome gás carbônico, e a aplicação de remineralizadores é uma técnica de intemperismo acelerado.

Souza et al. (2018) demonstraram que plantas de milho apresentaram um desenvolvimento mais expressivo quando adubadas com vermicomposto enriquecido com pó de gnaïsse em comparação ao uso apenas de vermicomposto. O peso seco dos brotos e as concentrações de potássio, cálcio, magnésio, manganês, níquel, cromo e chumbo na matéria seca do milho foram maiores quando o vermicomposto foi enriquecido com pó de gnaïsse. No solo, o pH, o fósforo e as concentrações de potássio e cálcio foram também maiores com o vermicomposto enriquecido. Além disso, não foram detectados níveis de metais pesados no solo após o experimento. Carpenter et al. (2007) apontam que o processo de vermicompostagem acelera o intemperismo dos minerais e a disponibilidade de nutrientes devido aos processos químicos e enzimáticos. Xiao et al. (2012) destacam que os fungos filamentosos presentes na compostagem podem exercer forças biofísicas capazes de levar à ruptura dos minerais, reduzindo o tamanho das partículas e criando superfícies reativas mais acessíveis à ação de outros microrganismos.

Medeiros (2022) avaliou o uso de pós de gnaïsse e esteatito vermicompostados em mudas de café arábica. O desenvolvimento das plantas (altura, diâmetro do caule, massa fresca das raízes e massa seca da parte aérea) foi melhor quando as plantas foram cultivadas em substratos contendo pós de gnaïsse e esteatito vermicompostados. No solo, o pH, a soma de bases, a CTC e a concentração de alguns macronutrientes e micronutrientes aumentaram nos tratamentos com esses pós de rochas vermicompostados. As concentrações de metais pesados (níquel, cádmio, cromo e chumbo) no substrato

enriquecido com pós de gnaiss ficaram abaixo dos limites estabelecidos pela legislação brasileira. Nas folhas, o Ni foi detectado em plantas cultivadas com pós de esteatito puro, mas não foi detectado quando esteatito foi vermicompostado.

Já existem estudos que avaliam a eficácia do processo de compostagem na melhoria da liberação de nutrientes das rochas moídas. Tavares et al. (2018) estudaram o uso de fonolito na compostagem com serragem, esterco de gado e resíduos de polpa de frutas. A adição de compostos influenciou positivamente a matéria seca da forragem do capim braquiária, promovendo um incremento médio de 27% em comparação ao controle. No entanto, esse ganho expressivo na produtividade de forragem pelo composto enriquecido, misto e puro, não diferiu estatisticamente entre si. Além disso, a fertilização com pó de fonolito in natura não resultou em aumento estatisticamente significativo na produção total de matéria seca da forragem quando comparado ao controle. O teor de K na forragem de capim braquiária foi significativamente aumentado pelos compostos quando comparado ao fonolito e ao tratamento controle. Contudo, não houve evidências de que o processo de compostagem tenha promovido o biointemperismo do fonolito.

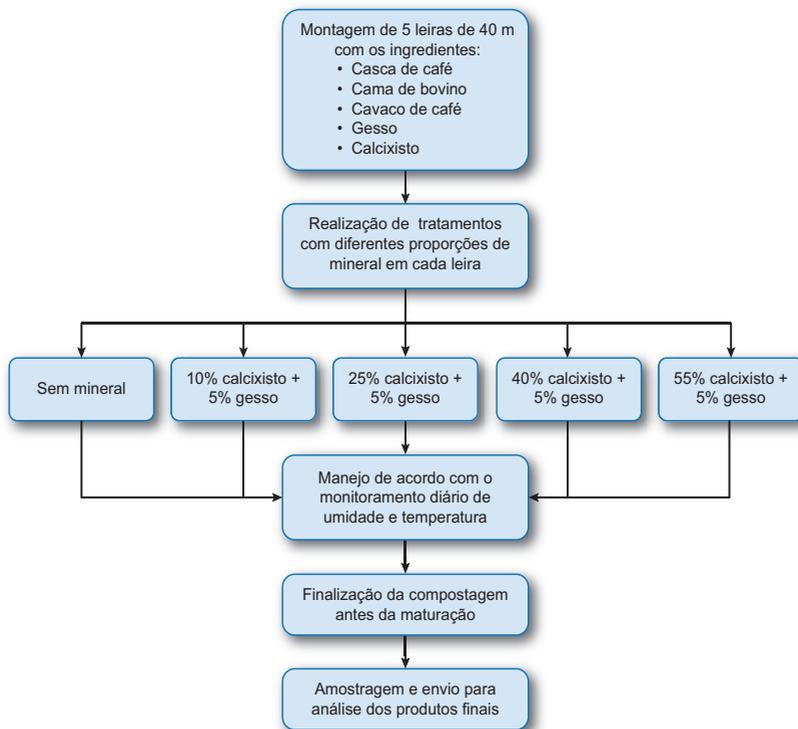
Badr (2006) realizou estudos para explorar a eficiência da combinação de feldspato e palha de arroz inoculados com bactérias dissolventes de silicato na capacidade de liberação de K do mineral por meio do processo de compostagem. A concentração de K disponível do feldspato aumentou significativamente com a compostagem, com o aumento máximo observado com a adição de 40% de feldspato. A inoculação com bactérias na massa de compostagem pareceu aumentar a porcentagem de K disponível no composto maduro em comparação com a massa não inoculada. Ademais, a resposta das plantas de tomate ao composto inoculado foi superior à resposta ao sulfato de potássio. A aplicação de fontes orgânicas de K melhorou consideravelmente o estado de fertilidade do solo, conforme medido pelos teores de C orgânico e NPK disponíveis no solo após a colheita, enquanto o feldspato e o sulfato de potássio não tiveram efeito significativo ou tiveram efeito limitado sobre o acúmulo de fertilidade.

Lima e Gomes (2011) avaliaram diversas receitas de compostagem com bagaço de cana-de-açúcar, borra proveniente da decantação da vinhaça, esterco de galinha poedeira e pós de rochas silicatadas (serpentinito e micaxisto). A dose de  $10 \text{ kg/m}^3$  de pós de rochas silicatadas no composto à base de borra elevou os teores de N, P e K em 23, 51 e 21%, respectivamente. O composto à base de esterco de galinha contendo pós de rochas silicatadas apresentou, em média, uma elevação do teor de N em torno de 6%, sendo que a dose não influenciou significativamente os resultados obtidos. O teor de P do composto com a dose de  $10 \text{ kg/m}^3$  de pós de rochas aumentou 34%, e o teor de K aumentou 12% em relação à testemunha. O teor de aumento de Ca e Mg foi 45 e 152%, respectivamente, no composto à base de borra que recebeu a adição de  $10 \text{ kg/m}^3$  de pós de rocha silicatada, enquanto o composto à base de cama de galinha alcançou, respectivamente, teores 50 e 24% superiores ao tratamento sem adição de rochas moídas.

Contudo, a dose de remineralizador a ser adicionada no início do processo de compostagem deve ser definida com cautela, pois o pó de rocha ocupa essencialmente os espaços porosos da parte orgânica da leira (Tavares et al., 2018). Dependendo da granulometria e mineralogia do remineralizador, uma dose excessiva pode reduzir a porosidade da leira de compostagem. Medeiros et al. (2023) destacam que ainda existem poucas pesquisas sobre o tema, mas não recomendam a adição de doses superiores a 25% de massa/volume. Por outro lado, doses menores, como 10%, garantem melhor porosidade e alteram menos a densidade do material final, sem modificar de forma expressiva as recomendações usuais de aplicação, geralmente expressas em unidades de massa.

Koepf et al. (1983) afirmaram que é vantajoso ter-se um mínimo de 5–10% de pó de basalto em qualquer composto, mas não mais do que 30%. Curtis et al. (2023) constataram, em ensaio de incubação, que a adição de 30% de pó de basalto na cama de frango foi o

tratamento que apresentou maior atividade microbiana e menor perda de nitrogênio. No entanto, a adição de uma maior proporção de pó de rocha resultou na redução dos teores de P e K extraíveis, e a adição de 10% produziu o composto com a maior quantidade de nutrientes. Höfig et al. (2023c) concluíram que, quando não ultrapassa 30% do peso total da receita de compostagem, o uso de rochas moídas estimula a atividade biológica na leira. No entanto, valores superiores a 30% dificultam o manejo devido ao aumento da densidade do material e diminuem a atividade biológica da compostagem (Figura 1).



**Figura 1.** Fluxograma com etapas da metodologia da pesquisa com diferentes teores de rochas moídas.

Fonte: Höfig et al. (2023c).

Um fertilizante produzido por meio da compostagem mecanizada com cama de bovino (36%), serragem (14%), casca de café (20%), gesso (5%), calcixisto (9%) e fosfato natural (16%), conforme estudo de Höfig et al. (2022), atendeu à maioria dos requisitos necessários para ser classificado como fertilizante orgânico composto classe A (Brasil, 2020). Isso se deve ao fato de o fertilizante possuir apenas ingredientes permitidos, umidade inferior a 50%, N total superior a 0,5% e relação C:N menor que 20. A única exceção foi o teor de carbono orgânico, que ficou abaixo de 15%, valor fora do limite permitido. Este resultado pode ser explicado pela mineralização do carbono orgânico, que é estimulada pelo fornecimento de íons cálcio e magnésio, presentes em grandes quantidades no remineralizador calcixisto. Já em composto com cama de bovino (35%), silagem de milho (5%), casca de café (30%), gesso agrícola (5%) e pó de rocha micaxisto (25%), Höfig et al. (2023b) concluíram que o composto atende aos requisitos necessários para ser classificado como fertilizante orgânico composto classe A (Figura 2).



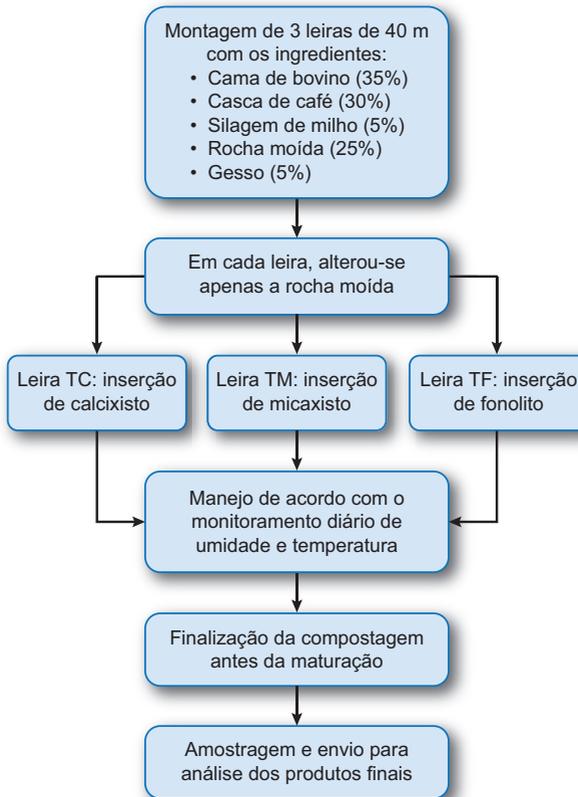
Fotos: Pedro Höfig

**Figura 2.** Revolvimento e umidificação das leiras de compostagem em uma propriedade rural em Unai, MG.

Khatounian (2001) aponta que a utilização de pós de rocha está associada à ativação biológica do sistema. Com a proporção adequada entre a parte orgânica e mineral, não há interferência negativa na atividade microbiana do composto, possibilitando o aproveitamento das temperaturas e dos ácidos formados durante o processo de compostagem para acelerar as reações entre as duas porções (orgânica e mineral). Dessa forma, parte desses minerais se torna disponível, ao mesmo tempo em que ficam protegidos (ligados à parte orgânica) de perdas por volatilização, lixiviação e adsorção. Kour et al. (2020) destacam que a produção de ácidos orgânicos fortes é um mecanismo crucial na solubilização de minerais potássicos, como mica, biotita, muscovita, feldspato, illita e ortoclásio.

Höfig et al. (2023d) testaram três diferentes remineralizadores no processo de compostagem mecanizada: fonolito, calcixisto e micaxisto. Os remineralizadores corresponderam a 25% do composto em cada tratamento, enquanto o restante foi composto por gesso (5%), cama de bovino (35%), casca de café (30%) e silagem de milho (5%) (Figura 3).

Neste estudo, a compostagem foi eficiente em todos os tratamentos, como demonstrado pela caracterização da fase termofílica e pela ausência de coliformes totais e de germinação de plantas daninhas. O tratamento com fonolito demandou manejos mais frequentes devido à menor retenção de água dessa rocha moída. Os compostos produzidos com micaxisto e fonolito atingiram todos os parâmetros de qualidade propostos pelo Mapa (Brasil, 2020), enquanto o composto orgânico com calcixisto apresentou teores de carbono orgânico abaixo do permitido. Nenhum tratamento atingiu a relação AH/AF superior a 1,6, proposta por Ko et al. (2008). No entanto, em compostagem tropical, tem-se considerado que valores próximos a 1 são ideais, pois a compostagem é concluída antes da fase de maturação, permitindo que as moléculas mais facilmente biodegradáveis ainda presentes no composto sejam mineralizadas pelos microrganismos do solo (Ramírez; Matos, 2022). Esse processo ocorre de forma mais rápida em clima tropical em comparação com o clima temperado.



**Figura 3.** Fluxograma com etapas da metodologia da pesquisa com diferentes teores de rochas moídas.

Fonte: Höfig et al. (2023d).

Ainda neste estudo, também foi contabilizado o aproveitamento dos elementos em cada tratamento, considerando o teor total inicial do nutriente e o teor disponível do nutriente ao final da compostagem, levando em conta a redução da massa total da leira. Os valores iniciais foram normalizados pela quantidade de matéria orgânica utilizada. Observou-se que a compostagem disponibilizou parte dos nutrientes que estavam retidos em forma de silicatos e carbonatos,

já que os ingredientes orgânicos eram os mesmos em todos os tratamentos, mas o teor final dos nutrientes variou (Tabela 2). O Ca foi o elemento mais disponibilizado, seguido pelo Mg e, por último, o K. Além disso, os tratamentos com micaxisto e fonolito apresentaram perda de N dentro do limite aceitável de 20% em relação à mistura inicial (Koepf et al., 1983). Medeiros et al. (2023) afirmam que a adição de pós de rochas silicáticas nas leiras de compostagem pode ajudar a reduzir a volatilização de nitrogênio. Esse efeito pode estar associado à formação de minerais secundários com cargas negativas, capazes de reter cátions como o amônio.

**Tabela 2.** Variação dos teores dos elementos químicos na matéria prima inicial e nos produtos finais.

Elemento	Tratamento com fonolito		Tratamento com micaxisto		Tratamento com calcixisto	
	Inicial*	Final**	Variação	Inicial*	Final**	Variação
Nitrogênio (N)	1,38	1,18	86,00	1,38	1,27	92,54
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,00	0,74	174,00	0,00	0,75	175,00
Potássio (K <sub>2</sub> O)	6,45	1,92	29,82	3,83	1,77	46,25
Cálcio (Ca)	3,47	2,65	76,40	3,76	2,70	72,61
Magnésio (Mg)	0,47	0,34	71,18	1,28	0,86	67,42
Enxofre (S)	1,12	0,62	55,46	1,12	0,64	57,25
Silício (Si)	7,12	10,47	146,94	10,62	10,6	99,81
MOT <sup>(1)</sup>	70,00	29,65	42,36	70,00	31,09	44,41

<sup>(1)</sup>MOT: matéria orgânica total.

\*Com exceção do N e MOT, o extrator utilizado para determinação nos resíduos orgânicos e no gesso foi ácido clorídrico. Para N e MOT, foi usado o ácido sulfúrico. Nas rochas moídas, utilizou-se determinação por fluorescência de raio-x.

\*\*Nitrogênio total digestão sulfúrica (Kjeldahl); Fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) determinação por espectrofotômetro pelo método com a solução de vanadomolibdica; Potássio (K<sub>2</sub>O) fotometria de chama; Enxofre (S) gravimétrico de sulfato de bário; Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) extração com HCl por espectrofotômetro de absorção atômica; Silício (Si) Korndörfer et al., 2004.

Fonte: Höfig et al. (2023d).

## Considerações finais

---

Fontes regionais de nutrientes (FRN), como os remineralizadores e o composto orgânico tropical, surgem como alternativas aos fertilizantes solúveis de síntese química (FSQ) para a agricultura em solos altamente intemperizados. Elas se distinguem dos adubos químicos sintéticos principalmente pelo grau de solubilidade, pela composição multinutriente e pela lenta atuação fisiológica, o que dificulta sua superdosagem. Além disso, o uso de FRN, em comparação ao uso de FSQ, reduz a necessidade de transporte e diminui a dependência dos fluxos internacionais, resultando em cadeias de produção mais transparentes e maior segurança em vários aspectos.

Os remineralizadores são caracterizados principalmente pela formação de novas fases minerais, correção de acidez e fornecimento de nutrientes para os solos. Seu princípio de funcionamento como fertilizante e condicionador de solo baseia-se no intemperismo biológico, o que implica a necessidade de um solo com alta atividade biológica. Por isso, é fundamental o uso de técnicas conservacionistas para garantir uma boa atividade dos microrganismos solubilizadores de nutrientes. Além disso, a composição química, mineralogia e granulometria do remineralizador devem ser avaliadas cuidadosamente.

O processo de compostagem transforma resíduos em composto orgânico, um material de fácil armazenamento e manuseio, com características químicas e biológicas adequadas às necessidades agrícolas. Esse processo potencializa atributos positivos e corrige propriedades indesejáveis, como a presença de coliformes, sementes de plantas daninhas e o calor extremo gerado pela decomposição da matéria orgânica crua.

Enquanto o processo de compostagem é beneficiado pela adição de remineralizadores, que servem de alimento para os microrganismos, os remineralizadores também são favorecidos pela compostagem, que inocula e inicia o processo de intemperismo biológico nas rochas antes mesmo de sua aplicação no solo. Esse processo continua no solo, que, com boa atividade biológica proporcionada pelo composto, mantém o intemperismo biológico em andamento.

A compostagem tropical com fontes orgânicas e remineralizadores é amplamente aplicável e adequada para ambientes simples e rudimentares. Com ingredientes de qualidade, receita equilibrada e manejo adequado, é possível realizar uma compostagem eficiente, mais rápida e com menor diminuição do volume inicial em comparação à compostagem clássica. Trata-se de uma excelente ferramenta para reduzir a histórica dependência do país por insumos importados, facilitando o manejo da fertilidade dos solos agrícolas no Brasil e assegurando um futuro mais soberano em relação aos fertilizantes.

Embora os estudos existentes sobre o uso de remineralizadores no processo de compostagem apontem benefícios, várias questões ainda permanecem em relação à qualidade dos produtos e suas proporções ideais. Nesse contexto, é essencial que as pesquisas continuem a avaliar a qualidade dos fertilizantes produzidos pela compostagem conjunta de fontes orgânicas e remineralizadores, bem como seus efeitos no solo e nas plantas. Dessa forma, esses produtos poderão se tornar uma ferramenta eficaz na busca pela soberania nacional na produção de alimentos.

## Referências

---

ALLEONI, L. R. F.; MELLO, J. W. V. de; ROCHA, W. S. D. da. Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. F.

**Química e mineralogia do solo: conceitos básicos e aplicações.** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 1381, 2019.

ANDA (Associação Nacional para Difusão de Adubos). **Principais indicadores do setor de fertilizantes.** Disponível em: [https://anda.org.br/pesquisa\\_setorial](https://anda.org.br/pesquisa_setorial). Acesso em: 9 jun. 2024.

ANDREOLI, C. V. (coord.). Higienização do Lodo de Esgoto: Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. In: ANDREOLI, C. V. **Lodo de Esgoto.** Rio de Janeiro: ABES, 2001.

AZEVEDO, A. C. de. Captura de gás carbônico atmosférico pelo intemperismo de minerais silicatados. **Informe Agropecuário**. Remineralizadores e a fertilidade dos solos, Belo Horizonte, v. 44, n. 321, 2023.

BADR, M. A. Efficiency of K-feldspar Combined with Organic Materials and Silicate Dissolving Bacteria on Tomato Yield. **Journal of Applied Sciences Research**, v. 2, n. 12, p. 1191-1198, 2006.

BAMBERG, A. L.; MARTINAZZO, R.; SILVEIRA, C. A. P.; PILON, C. N.; STUMPF, L.; BERGMANN, M.; STRAATEN, P. van; MARTINS, E. de S. Selected rock powders as sources of nutrients for soil fertilization and maize-wheat grain production in southern Brazil. **The Journal of Agricultural Science**, v. 161, n. 5, p. 654-668, Oct. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1017/S002185962300062X>.

BASAK, B. B.; SARKAR, B.; NAIDU, R. Environmentally safe release of plant available potassium and micronutrients from organically amended rock mineral powder. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 43, p. 3273-3286, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00677-1>.

BEERLING, D. J.; KANTZAS, E. P.; LOMAS, M. R.; WADE, P.; EUFRASIO, R. M.; RENFORTH, P.; SARKAR, B.; ANDREWS, M. G.; JAMES, R. H.; PEARCE, C. R.; MERCURE, J. F.; POLLITT, H.; HOLDEN, P. B.; EDWARDS, N. R.; KHANNA, M.; KOH, L.; QUEGAN, S.; PDGEON, N. F.; JANSSENS, I. A.; HANSEN, J.; BANWART, S. A. Potential for large-scale CO<sub>2</sub> removal via enhanced rock weathering with croplands. **Nature**, v. 583, 7815, p. 242-248, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>.

BEERLING, D. J.; LEAKE, J. R.; LONG, S. P.; SCHOLLES, J. D.; TON, J.; NELSON, P. N.; BIRD, M.; KANTZAS, E.; TAYLOR, L. L.; SARKAR, B.; KELLAND, M.; LUCIA, E de; KANTOLA, I.; MÜLLER, C.; RAU, G. H.; HANSEN, J. Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security perspective. **Nature Plants**, v. 4, n. 3, p. 138-147, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0108-y>.

BERTON, R. S.; CHIBA, M. K.; COSCIONE, A. R., ABREU, M. F. da; NASCIMENTO, A. L. **Compostagem para fins agrícolas**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 2021. 116 p.

BRASIL. Lei n. 12.890. Altera a Lei no 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 11 dez. 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2016. Instrução Normativa nº. 5, de 10 de março de 2016. **Diário Oficial da União**, Seção 1, p. 10.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa 61, de 08 de julho de 2020. Normatização dos fertilizantes orgânicos e biofertilizantes. **Diário Oficial da União**, Seção 1, p. 5.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução n. 481, de 3 de Outubro de 2017**. Estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=728>.

BRASIL. **Zoneamento agrogeológico do Brasil, escala 1:1.000.000**. Disponível em <http://www.cprm.gov.br/impressao/pdf/zag181205.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2020.

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

CAMPBELL, N. S. **The use of rockdust and composted materials as soil fertility amendments**. 2009. 402 f. Ph. D. thesis submitted to the Faculty of Physical Sciences, Department of Chemistry, University of Glasgow, 2009.

CANTÚ, R. R.; MORALES, R. G. F.; SCHALLENBERGER, E.; VISCONTI, A. **Compostagem: estratégias para transformar resíduos em fertilizante**. Florianópolis: EPAGRI/DEMC, 2022. 21 p.

CARPENTER, D.; HODSON, M. E.; EGGLETON, P.; KIRK, C. Earthworm induced mineral weathering: preliminary results. **European Journal of Soil Biology**, v. 43, 2007.

CARVALHO, A. M. X. Rochagem: um novo desafio para o manejo sustentável da fertilidade do solo. In: SILVA, J. C.; SILVA, A. A. S.; ASSIS, R. T. (ed.). **Sustentabilidade e Inovações no Campo**. Uberlândia: Composer. 2013. p. 117–132.

CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A. E.; SANTOS, C. D.; FERNANDES, L. A.; CURI, N.; RODRIGUES, D.C. Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 557-565, mar. 2001.

CHEN, B., LIU, E., TIAN, Q. et al. Soil nitrogen dynamics and crop residues. A review. **Agronomy and Sustainable Development**, v. 34, p. 429-442, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0207-8>.

CHESWORTH, W.; VAN STRAATEN, P.; SEMOKA, J. M. R. Agrogeology in East Africa: the Tanzania-Canada project. **Journal of African Earth Sciences**, v. 9, n. 2, p. 357-362, dez. 1989.

CHO, Y. **Agricultura orgânica JADAM**: o caminho para uma agricultura de ultrabaixo custo. Yuseonggu, Daejon, República da Coréia: JADAM, 2018.

COOPER, M.; ZANON, A. R.; REIA, M. Y.; MORATO, R. W. **Compostagem e reaproveitamento de resíduos orgânicos agroindustriais**: teórico e prático. Piracicaba: ESALQ: Divisão de Biblioteca, 2010.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides**: Structure, properties, reaction, occurrence and uses. New York: VHC Publishers, 1996. 573 p.

COTTA, J. A. de O. CARVALHO, N. L. C.; BRUM, T. da S.; REZENDE, M.O. de O. Compostagem versus vermicompostagem: comparação das técnicas utilizando resíduos vegetais, esterco bovino e serragem. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 65-78, Mar. 2015.

CRUSCIOL, C. A. C., ROSSATO, O. B., FOLTRAN, R., MARTELLO, J. M., & NASCIMENTO, C. A. C. D. Soil fertility, sugarcane yield affected by limestone, silicate, and gypsum application. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 19, p. 2314-2323, 2017.

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

CURTIS, J. C. D.; LUCHESE, A. V.; MISSIO, R. F. Evaluation of microbial activity, N-NH<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub> losses in poultry litter treated with basalt rock powder. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 12, p. 25-35, 2023. DOI:10.30486/IJROWA.2022.1932913.1270.

DAL BOSCO, T. C.; GONÇALVES, F.; ANDRADE, F. C. de; TAIATELE JUNIOR, I.; SILVA, J. dos S.; SBIZZARO, M. Contextualização teórica: compostagem e vermicompostagem. In: COMPOSTAGEM E VERMICOMPOSTAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS: resultados de pesquisas acadêmicas. São Paulo: Blucher, 2017. p. 19-44.

DALMORA, A. C.; RAMOS, C. G.; PLATA, L. G.; da COSTA, M. L.; KAUTZMANN, R. M.; OLIVEIRA, L. F. S. Understanding the mobility of potential nutrients in rock mining by-products: An opportunity for more sustainable agriculture and mining. **Science of the Total Environment**, v. 710, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136240>

DIAS, H. B.; AZEVEDO, A. C. de; IEDA, J. J. C. pH de abrasão com índice de alteração de basalto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Ciência do solo: para quê e para quem?** anais. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

DIAS, K. G. de L.; GUIMARÃES, P. T. G.; do CARMO, D. L.; Reis, T. H. P.; LACERDA, J. J. de J. Alternative sources of potassium in coffee plants for better soil fertility, productivity, and beverage quality. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 12, p. 1355-1362, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018001200008>.

EPSTEIN, E. **The Science of Composting**. Florida: CRC Press LLC, 1997. p. 502.

FAOSTAT. Statistical Yearbook: World Food and Agriculture, 2023. 384 p.

- FEIDEN, A. **Conceitos e princípios para o manejo ecológico do solo**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2001. 21 p. (Embrapa Agrobiologia. Documentos, 140).
- FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para compostagem de bio sólidos**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 79 p.
- FERREIRA, J. M. L.; MEYER, E.; LOVATO, P. E.; LANA, M. A. Ativação biológica no solo e o uso de remineralizadores. **Informe Agropecuário**. Remineralizadores e fertilidade do solo, Belo Horizonte, v. 44, n. 321, 2023.
- FONG, M.; WONG, J. W. C.; WONG, M. H. Review on evaluation of compost maturity and stability of solid waste. **Shanghai Environmental Sciences**, v. 18, p. 91-93, 1999.
- FYFE, W. S.; LEONARDOS, O. H.; THEODORO, S. H. Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution, **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, n. 4, p. 715-720, 2006.
- GLIESMANN, S. R. Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável. Porto Alegre: UFRGS, 2000. 653 p.
- GOMES-CASSERES, B.; MCQUADE, K. **Hoechst and the German chemical industry**. Boston: Harvard Business School, 1991.
- GRAHAM, J. **Investigation into the composting of poultry carcasses and the use of rock dust as a compost enhancer**. BSc thesis. University of Glasgow, 2001.
- GRANT, W. H. **Abrasion pH, an index of chemical weathering**. Clays and Clay Minerals, v. 17, p. 151-155, 1969.
- HALLER, H. **Efficacy, sustainability and diffusion potential of rock dust for soil remediation in Chontales, Nicaragua**. 2011. 38 f. Mid Sweden University, Faculty of Science, Technology and Media, Department of Engineering and Sustainable Development, 2011.
- HAYNES, R. J. The decomposition process: Mineralization, immobilization, humus formation and degradation. In: HAYNES, R. J. (ed.). **Mineral nitrogen in the plant soil system**. Orlando: Academic Press, 1986. p. 52-176.

HENSEL, J. **Pães de pedra**: Brot aus Steinen, durch mineralische Düngung der Felder. Canoas: Salles, 1898. 79 p.

HINSINGER, P.; ELSASS, F.; JAILLARD, B.; ROBERT, M. Root-induced irreversible transformation of a trioctahedral mica in the rhizosphere of rape. **Journal of Soil Science**, v. 44, n. 3, p. 535-545, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb00475.x>

HINSINGER, P.; FERNANDES BARROS, O. N.; BENEDETTI, M. F.; NOACK, Y.; CALLOT, G. Plant-induced weathering of a basaltic rock: experimental evidence. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 65, n. 1, p. 137-152, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00524-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00524-X)

HÖFIG, P. **Compostagem conjunta de resíduos orgânicos e rochas moídas na cafeicultura: vida nova para a terra**. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade de Brasília, 2023a.

HÖFIG, P.; MARTINS, É. S. Avaliação de um fertilizante produzido com compostagem de fontes regionais de nutrientes. **Estrabão**, v. 4, 2023b.

HÖFIG, P.; MARTINS, É. S.; BROETTO, T.; GIASSON, E.; ARANTES, B. S. Efeitos de diferentes proporções de rochas moídas no processo de compostagem. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 18, n. 3, p. 133-153, 2023c.

HÖFIG, P.; MARTINS, É. S.; BROETTO, T.; GIASSON, E.; SILVA, G. M. F. da. Avaliação da qualidade de um fertilizante produzido por compostagem conjunta de materiais orgânicos e rochas moídas, **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente – RAMA**, v. 15, n. 3, 2022.

HÖFIG, P.; MARTINS, É. S.; GIASSON, E.; ARANTES, B. S. Diferentes rochas moídas no processo de compostagem em Unaí/MG: fertilizante orgânico e autonomia agrícola. **Geographia Opportuno Tempore**, v. 9, n. 1, e47425, 2023d. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/Geographia/article/view/47425>. Acesso em: 29 mar. 2023.

HÖFIG, P.; MARTINS, É. S.; GIASSON, E. MARCHI, G.; CORRÊA, R. S. Comportamento dos solos, produção de café e qualidade de bebida em dois sistemas de adubação usando fontes convencionais e regionais de nutrientes. **Revista Caderno Pedagógico**, Curitiba, v. 21, n. 6, 2024.

HOWARD, A. **Um testamento agrícola**. São Paulo: Expressão Popular, 2007. 360 p.

ILCHENKO, O. V.; GUIMARÃES, D. **Sobre a possibilidade de utilização agrícola dos sienitos nefelínicos do planalto de Poços de Caldas, Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Instituto de Tecnologia Industrial, 1953. 15 p. (Avulso, 15).

INÁCIO, C. de T.; MILLER, P. R. M. **Compostagem: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 154 p.

ISHIMURA, I.; YAMAMOTO, S. M.; SANTOS, C. dos; OLIVEIRA, M. A. de. **Olericultura orgânica: compostagem**. São Paulo: SENAR/SP, 2006. 4 p.

JIMENEZ-GÓMEZ, S. **Fertilizantes de Liberación Lenta**. Madrid: Mundi-Prensa, 1992. 146 p.

JONES, D. L.; CHESWORTH, S.; KHALID, M.; IQBAL, Z. Assessing the addition of mineral processing waste to green waste-derived compost: An agronomic, environmental and economic appraisal. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 2, p. 770-777, 2009.

KÂMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: MELO, V. de F.; ALLEONI, R. F. (ed.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2009.

KELLAND, M. E.; WADE, P. W.; LEWIS, A. L.; TAYLOR, L. L.; SARKAR, B.; ANDREWS, M. G.; LOMAS, M. R.; ANNE COTTON, T. E.; KEMP, S. J.; JAMES, R. H.; PEARCE, C. R.; HARTLEY, S. E.; HODSON, M. E.; LEAKE, J. R.; BANWART, S. A.; BEERLIN, D. J. Increased yield and CO<sub>2</sub> sequestration potential with the C<sub>4</sub> cereal Sorghum bicolor cultivated in basaltic rock dust-amended agricultural soil. **Global Change Biology**, v. 26, n. 6, p. 3658-3676, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15089>

KHATOUNIAN, C. A. **A reconstrução ecológica da agricultura**. Botucatu: Agroecológica, 2001. 348 p.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, 1985. 492 p.

KIEHL, E. J. **Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto**. 4. ed. Piracicaba, 2004. 173 p.

KOEPEF, H. H.; PETTERSSON, B. D.; SCHAUMANN, W. **Agricultura biodinâmica**. São Paulo: Nobel, 1983.

KO, H. J.; KIM, K. Y.; KIM, H. T.; KIM, C. N.; UMEDA, M. Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure. **Waste Management**, v. 28, n. 5, p. 813-820, 2008.

KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; NOLA, A. **Análise de silício**: solo, planta e fertilizante. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2004. 34p. (Boletim técnico, 2).

KOUR, D.; RANA, K. L.; KAUR, T.; YADAV, N.; HALDER, S. K.; YADAV, A. N.; SACHAN, S. G.; SAXENA, A. K. Potassium solubilizing and mobilizing microbes: Biodiversity, mechanisms of solubilization, and biotechnological implication for alleviations of abiotic stress. In: RASTEGARIA, A. A.; YADAV, A. N.; YADAV, N. **New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering**. Amsterdã: Elsevier, 2020.

KRAHL, L. L.; MARCHI, G.; PAZ, S. P. A.; ANGÉLICA, R. S.; SOUSA-SILVA, J. C.; VALADARES, L. F.; MARTINS, É. S. Increase in cation Exchange capacity by the action of maize rhizosphere on Mg or Fe biotite-rich rocks. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, 2022.

KRAHL, L. L.; PAZ, S. P. A. da; ANGÉLICA, R. S.; VALADARES, L. F.; SOUZA-SILVA, J. C.; MARCHI, G.; MARTINS, É. S. Successive off take of elements by maize grown in pure basalt powder. **African Journal of Agricultural Research**, v. 15, p. 229-239, fev. 2020.

LATOUCHE, S. **Pequeno tratado do decrescimento sereno**. São Paulo: Editora WMF Martins Fontes, 2018. 170 p.

LEFEBVRE, D.; GOGLIO, P.; WILLIAMS, A.; MANNING, A. C.; AZEVEDO, A. C. de; BERGMANN, M.; MEERS, J.; SMITH, P. 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**, v. 233, p. 468-481, out. 2019.

LEONARDOS, O. H.; FYFE, W. S.; KRONBERG, B. I. Rochagem: o método de aumento da fertilidade em solos lixiviados e arenosos. In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA, **Anais...** Belo Horizonte, 1976. p. 137-145.

LEONARDOS, O. H.; FYFE, W. S.; KRONBERG, B. I. The use of ground rocks in laterite systems: An improvement to the use of conventional soluble fertilizers? **Chemical Geology**, v. 60, p.1-4, p. 361-370, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(87\)90143-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(87)90143-4).

LEONARDOS, O. H.; THEODORO, S. H.; ASSAD, M. L. Remineralization for sustainable agriculture: A tropical perspective from a Brazilian viewpoint. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 56, p. 3-9, 2000.

LEPSCH, I. V. **19 Lições de Pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LIMA, M. C. A.; LEITE, J. P.; LYRA, M. A. **Emprego de rochas trituradas como fertilizante potássico na lavoura canavieira**. Recife: Secretaria de Agricultura: Instituto de Pesquisas Agronômicas de Pernambuco, 1969. 37 p. (Boletim Técnico, 40).

LIMA, C. C. de; GOMES, T. C., de A. Concentração de nutrientes em compostos orgânicos influenciada pela adição de pós de rochas silicatadas. **Educte**, v. 1, p. 33-39, 2011.

LIU, L; WANG, S.; GUO, X.; ZHAO, T.; ZHANG, B. Succession and diversity of microorganisms and their association with physicochemical properties during green waste thermophilic composting. **Waste Management**, v. 73, p. 01-112, 2018.

LI, J.; MAVRODI, D. V.; DONG, Y. Effect of rock dust-amended compost on the soil properties, soil microbial activity, and fruit production in an apple orchard from the Jiangsu province of China. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1-14, 2020.

LIEBIG, J. von. **Die Chemie in Ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie**. Braunschweig: Vieweg, 1865.

LUCHESE, A. V.; PIVETTA, L. A.; BATISTA, M. A.; STEINER, F.; GIARETTA, A. P. S.; CURTIS, J. C. D. Agronomic feasibility of using basalt powder as soil nutrient remineralizer. **African Journal of Agricultural Research**, v. 17, p. 487-497, 2021.

MACKINTOSH, E. E.; LEWIS, D. G. Displacement of potassium from micas by dodecylammonium chloride. In: INTERNATIONAL CONGRESS

OF SOIL SCIENCE, 9., Adelaide, 1968. **Transactions**. Adelaide, 1968. v. 4. p. 695-703.

MAGALHÃES, W. L. E.; SÁ, F. P.; BELNIAKI, A. C.; LIMA, E. A. de. **Composto produzido com resíduos da agroindústria do palmito pupunha**. Colombo: Embrapa Florestas, 2021. 8 p. (Embrapa Florestas. Comunicado Técnico, 473).

MANNING, D. A. C. Innovation in Resourcing Geological Materials as Crop Nutrients. **Natural Resources Research**, v. 27, n. 2, p. 217-227, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9347-2>.

MANNING, D. A. C.; THEODORO, S. H. Enabling food security through use of local rocks and minerals. **The Extractive Industries and Society**, v. 7, n. 2, p. 480–487, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.11.002>.

MARCHI, G.; GUELFY-SILVA, D. R.; MALAQUIAS, J. V.; GUILHERME, L. R. G.; SPEHAR, C. R.; MARTINS, É. S. Solubility and availability of micronutrients extracted from silicate agrominerals. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Thematic Issue - Regional Agrominerals, v. 55, e00807, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2020.v55.00807>

MARTINAZZO, R.; BERGMANN, M.; SILVEIRA, C. A. P.; BAMBERG, A. L.; TORRES, D. P.; SANDER, A. **Micronutrientes e metais pesados em agrominerais: caracterização de rochas do escudo sul-rio-grandense e da Bacia do Paraná**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2020. 49 p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 488).

MARTINS, É. S. Proposta de critérios de normatização de rochas silicáticas como fontes de nutrientes e condicionadores de solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 2., 2013, Poços de Caldas. **Anais**. Poços de Caldas: Petrobrás: Embrapa, 2013. p. 368-378.

MARTINS, É. S.; MARTINS, E. S.; HARDOIM, P. R. Princípios geoquímicos, mineralógicos e biológicos do manejo de remineralizadores de solos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 44, n. 321, 2023. (Remineralizadores e a fertilidade do solo).

MARTINS, É. S.; RESENDE, A. V. de; OLIVEIRA, C. G. de; FURTINI-NETO, A. E. Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes

e condicionadores de solos. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B. da; CASTILHOS, Z. C. (ed.). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 380 p.

MARTINS, É. S.; SILVEIRA, C. A. P.; BAMBERG, A. L.; MARTINAZZO, R.; BERGMANN, M.; ANGÉLICA, R. S. 2014. Silicate agrominerais as nutrient sources and as soil conditioners for tropical agriculture. In: WORLD FERTILIZER CONGRESS OF CIEC, 16., 2014, Rio de Janeiro. **Technological innovation for a sustainable tropical agriculture: proceedings**. Rio de Janeiro: International Scientific Centre of Fertilizers, 2014. p. 138-140.

MARTINS, É. S.; THEODORO, S. H.; BERNARDEZ, F. F. G.; LUCHESE, A. V.; BERGMANN, M.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, A.; AZEVEDO, A.; CURTIS, J. C. D. Produção Brasileira de Remineralizadores e Fertilizantes Naturais: 2019 a 2023. **Revista Novo Solo**, ano 3, edição 6, p. 14-29, 2024.

MASSUKADO, L. M. **Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software livre para o gerenciamento municipal dos resíduos sólidos domiciliares**. 2008. 204 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MATICHENKOV, V. V.; BOCHARNIKOVA, E. A. The relationship between silicon and soil physical and chemical proprieties. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KONDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. v. 8.

MEDEIROS, F. de P. Bioprocessos para otimização do uso de pós de rocha na agricultura. 2022. 178 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2022.

MEDEIROS, F. de P.; CARVALHO, A. M. X. de; CARDOSO, I. M. Compostos e vermicompostos enriquecidos com pós de rochas. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 44, n. 322, 2023. Bioinsumos: das biofábricas à produção nas propriedades rurais.

MELAMED, R.; GASPAR, J. C.; MIEKELEY, N. Pó-de-rocha como fertilizante alternativo para sistemas de produção sustentáveis em solos

tropicais. **Fertilizantes: Agroindústria e Sustentabilidade**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. p. 385-395.

MELO, V. F.; UCHÔA, S. C. P.; DIAS, F. de O.; BARBOSA, G. F. Doses de basalto moído nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 4, p. 471-476, 2012.

MISRA, R. V.; ROY, R. N.; HIRAOKA, H. **On-farm composting methods**. Rome: FAO, 2003. 48 p.

MISSOUX, M. Sur l'emploi de la poudre des roches granitiques comme excitant de la vegetation. **Compte Rendu de l'Academia des Sciences**, Paris, t. 36: p. 1136; t. 37: p. 245, 1853.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Ed. UFLA, 2006. 626 p.

MORTLAND, M. M.; LAWTON, K.; UEHARA, G. Alteration of biotite to vermiculite by plant growth. **Soil Science**, v. 82, 1956.

MOTTA JUNIOR, R. L.; MATTIELLO, E. M.; MATIAS, P. C.; BALLOTIN, F. C.; DE LIMA, G. E. S.; PEDROTI, L. G.; BRANDÃO, L. Analysis of potential applications of Kamafugite rocks in fertilizer. In: LI, J. (ed.). **Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2021**. Amsterdam: Springer International Publishing, 2021. p. 233-240.

ORRICO, A. C. A.; LUCAS-JÚNIOR, J. de; ORRICO-JÚNIOR, M. A. P. Alterações físicas e microbiológicas durante a compostagem dos dejetos de cabras. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 3, p. 764-772, set./dez. 2007.

ORRICO-JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS-JÚNIOR, J. de. Compostagem da fração sólida da água residuária de suinocultura. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 3, p. 483-491, jul./set. 2009.

O'BRIEN, T. A.; BARKER, A. V.; CAMPE, J. Container production of tomato with food by-product compost and mineral fines. **Journal of plant nutrition**, v. 22, n. 3, p. 445-457, 1999.

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. **Soil microbiology and biochemistry**. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2007. 579 p.

- PEIXOTO, R. T. dos. G. **Compostagem**: opção para o manejo orgânico do solo. Londrina: IAPAR, 1988. 46 p.
- PENTEADO, S. R. **Adubação orgânica**: compostos orgânicos e biofertilizantes. 3. ed. São Paulo: Via Orgânica, 2010. 160 p.
- PEREIRA-NETO, J. T. **Manual de compostagem**. Belo Horizonte: UNICEF, 1996.
- PEREIRA-NETO, J. T. **Manual de compostagem**: processo de baixo custo. Viçosa, MG: UFV, 2007. 81 p.
- PERES, F. C.; HIRONAKA, G. M. F. N.; CANZIANI, J. R.; GUIMARÃES, V. di A.; OLIVEIRA, M. M. C. de. **O programa empreendedor rural**. Curitiba: SEBRAE/PR e SENAR/PR, 2010.
- PINHEIRO, S. **Agroecologia 7.0**. Porto Alegre: Juquira Candiru Satyagraha, 2018. 663 p.
- PINHEIRO, S. **Biopoder camponês**: território, questão agrária, agroecologia, espiritualidade e a nutrição ultrassocial. Porto Alegre: Gráfica da UFRGS, 2021. 282 p.
- PORTILLO, N.; LEONARDOS, O. H. Ph de abrasão em rochas e sua aplicação na agricultura. **Boletim Mineralógico**, Recife, v. 4, p. 43-46, 1976.
- POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A.; BOTELHO, D. M. dos S. Silicon in plant disease control. **Revista Ceres**, v. 62, n. 3, 2015.
- PRATT, C.; KINGSTON, K.; LAYCOCK, B.; LEVETT, I.; PRATT, S. Geo-Agriculture: Reviewing Opportunities through Which the Geosphere Can Help Address Emerging Crop Production Challenges. **Agronomy**, v. 10, n. 7, 971, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10070971>.
- PRESS, F.; GROTZINGER, J.; SIEVER, R.; JORDAN, T. H. **Para entender a Terra**. Porto Alegre: Bookman, 2006. 656 p.
- PRIMAVESI, A. **Pergunte o porquê ao solo e às raízes**: casos que auxiliam na compreensão de ações eficazes na produtividade agrícola. São Paulo: Expressão Popular, 2021. 356 p.

PRIYONO, J.; GILKES, R. J. Dissolution of milled-silicate rock fertilisers in the soil. **Soil Research**, v. 42, n. 4, p. 441, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR03138>.

PRIYONO, J.; SUTRIONO, R.; ARIFIN, Z. Evaluation for the Potential Use of Silicate Rocks from Four Volcanoes in Indonesia as Fertilizer and Soil Ameliorant. **Jurnal Tanah Tropika**, v. 14, n. 1, p. 1-8, 2009.

RAMÍREZ, V. S.; MATOS, A. T. Influência da textura do solo receptor e das condições climáticas e ambientais na taxa e fração de mineralização da matéria orgânica no solo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 2, p. 315-323, mar./abr. 2022.

RAMOS, C. G.; HOWER, J. C.; BLANCO, E.; OLIVEIRA, M. L. S.; THEODORO, S. H. Possibility of uses of silicate rocks powder: A review. **Geoscience Frontiers**, 101185, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185>.

RESENDE, A. V.; MACHADO, C. T. T.; MARTINS, É. S.; NASCIMENTO, M. T.; SENA, M. C.; SILVA, L.; LINHARES, N. W. **Rochas moídas como fontes de potássio para o milho em solo de cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2006a. 20 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 162). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/567446/1/bolpd162.pdf>

RESENDE, A. V.; MARTINS, É. S.; OLIVEIRA, C. G.; SENA, M. C.; MACHADO, C. T. T.; KINPARA, D. I.; OLIVEIRA FIÇHO, E. C. Suprimento de Potássio e Pesquisa de Uso de Rochas in natura na Agricultura Brasileira. **Espaço & Geografia**, v. 9, p. 19-42. 2006b.

RIBEIRO, L. da S.; SANTOS, A. R. dos; SOUZA, F. da S.; SOUZA, J. S. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fonte de nutriente para as plantas solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 891-897, 2010.

RICI, M. dos S. F.; NEVES, M. C. P. **Cultivo do café orgânico**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2004. 95 p.

ROCHA, E. J. P. L. **Agroflorestas sucessionais no assentamento Fruto D'anta/MG**: potenciais e limitações para a transição agroecológica. 2006.

142 f. Dissertação de mestrado – Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Brasília/DF, 2006.

RODRIGUES, A. F. S. Agronegócio e mineral negócio: relações de dependência e sustentabilidade. In: INFORME mineral: desenvolvimento e economia mineral. Brasília, DF: DNPM, 2009. p. 28-47.

RODRIGUES, M.; NANNI, M. R.; POSSER SILVEIRA; C. A.; SILVA GUALBERTO, A. A. da. Mining coproducts as alternative sources of nutrients for the cultivation of sugarcane (*Saccharum officinarum*). **Journal of Cleaner Production**, v. 291, 125925, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125925>.

RODRIGUES, M.; VAHL, L. C.; SILVEIRA, C. A. P.; SALÉ, M. M.; NANNI, M. R.; BATISTA, M. A. Co-products from the limestone mining as sources of calcium, magnesium and sulphur. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 15, 100446, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100446>.

RODRIGUES, M. S.; SILVA, F. C. da; BARREIRA, L. P.; KOVACS, A. Compostagem: reciclagem de resíduos sólidos orgânicos. In: SPADOTTO, C. A.; RIBEIRO, W. C. (org.). **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria**. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2006. v. 1, p. 63-94.

RUDMIN, M.; BANERJEE, S.; MAKAROV, B.; MAZUROV, A.; RUBAN, A.; OSKINA, Y.; TOLKACHEV, O.; BUYAKOV, A.; SHALDYBIN, M. An investigation of plant growth by the addition of glauconitic fertilizer. **Applied Clay Science**, v. 180, 105178, Nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105178>.

SANTOS, L. C.; SILVA, G. A. M.; ABRANCHES, M. O.; ROCHA, J. L. A.; SILVA, S. T. A.; RIBEIRO, M. D. S.; GOMES, V. R.; SEVERO, P. J. S.; BRILHANTE, C. L.; SOUSA, F. Q. The role of silicon in plants. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, e3810716247, 2021a. DOI: [10.33448/rsd-v10i7.16247](https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16247).

SANTOS, L. F.; SODRÉ, F. F.; MARTINS, E. S.; FIGUEIREDO, C. C.; BUSATO, J. G. Effects of biotite syenite on the nutrient levels and electrical

charges in a Brazilian Savanna Ferralsol. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 51, e66691, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632021v5166691>

SHELLER, E. **Fundamentos científicos da nutrição vegetal na agricultura ecológica**. Botucatu: Associação Brasileira de Agricultura Biodinâmica, 2000. 94.

SETIAWAT, T. C.; MUTMAINNAH, L. Solubilization of potassium containing mineral by microorganisms from sugarcane rhizosphere. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, 9, p. 108-117, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.134>

Sharma, V. K.; Canditelli, M.; Fortuna, F.; Cornacchia, C. Processing of urban and agroindustrial residues by anaerobic composting: review. **Energy Conversion and Management**, v. 38, n. 5, p. 453-478, Mar. 1997.

SIKORA, L. J. Effects of basaltic mineral fines on composting. **Waste management**, v. 24, n. 2, p. 139-142, 2004.

SILVA, R. C. da; CURY, M. E.; IEDA, J. J. C.; SERMARINI, R. A.; AZEVEDO, A. C. Chemical attributes of a remineralized Oxisol. **Ciência Rural**, v. 47, 2017.

SILVA, R. C. da; FERREIRA, E. P.; AZEVEDO, A. C. de. Weathering features of a remineralizer in soil under different land uses. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 56, p. e01442, 2021

SILVA, S. P. A. da. **Efeito de corretivos orgânicos de resíduos vinícolas e biochar, com diferentes tempos de compostagem, na cultura do alface**. 2019. 81 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Biológica) – Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Viana do Castelo, 2019.

SILVA, V. M. da; RIBEIRO, P. H.; TEIXEIRA, A. F. B., SOUZA, J. L. de. Qualidade de compostos orgânicos preparados com diferentes proporções de ramos de gliricídia (*Gliricidia sepium*). **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 8, n. 1, p. 187-198, abr. 2013.

SONG, S. K.; HUANG, P. M. Dynamics of Potassium Release from Potassium-Bearing Minerals as Influenced by Oxalic and Citric Acids. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, p. 383-390, 1998.

SOUZA, M. E. P.; CARDOSO, I. M.; CARVALHO, A. M. X. de; LOPES, A. P. Rock powder can improve vermicompost chemical properties and plant nutrition: an on-farm experiment. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 1, 2018.

SUSZEC, M. **Efeitos da inoculação na compostagem e vermicompostagem de resíduos sólidos verdes urbanos**. 2005. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2005.

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

SZMIDT, R. A. K. Scope for co-utilization of compost and mineral rockdusts. In: PAPANITRIOU, E. K.; STENTIFORD E. I. (ed.). **Biodegradable and Residual Waste Management**. Leeds: Cal Recovery, 2004.

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

TARUMOTO, M. B. **Basalt rock in sugarcane grown in ferralsols: changes in soil chemistry, mineralogy, and microbiology and in crop yield**. 2019. 109 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrômicas, Botucatu, 2019.

TAVARES, L. de F. **Disponibilização de potássio e silício de remineralizador pelo processo de compostagem**. 2017. 55 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa, Instituto de Ciências Agrária, Rio Paranaíba, 2017.

TAVARES, L. F.; de CARVALHO, A. M. X.; CAMARGO, L. G. B.; PEREIRA, S. G. de F.; CARDOSO, I. M. Nutrients release from powder phonolite mediated by bioweathering actions. **Int J Recycl Org Waste Agricult**, v. 7, p. 89-98, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0194-x>

TAVERNE, J. **Innovative waste treatment by composting with minerals and worms: effects on carbon storage, soil properties and plant growth**. Tese (Doutorado) - Ecology, environment. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2017.

TEIXEIRA, A. Estratégia de uso de compostos. In: ALMEIDA, F. S.; SANTOS, M. C. dos (org.). **Guia de desenvolvimento de práticas para uma agricultura climaticamente inteligente**: benefícios ao solo, água e clima. Patrocínio: Consórcio Cerrado das Águas, 2024.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2008.

THEODORO, S. H. **Cartilha da rochagem**. Brasília, DF: Gráfica e Editora Ideal, 2020. 32 p.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. Rochagem: uma questão de soberania nacional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 13., 2011, Gramado. **Anais**[...]. Gramado: SBGq, 2011. p. 337-340.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. Stonemeal: principles, potential and perspective from Brazil. In: GOREAU, T. J.; LARSON, R.W.; CAMPE, J. (ed.). **Geotherapy**: Innovative Methods of Soil Fertility Restoration, Carbon Sequestration and Reversing CO<sub>2</sub> Increase. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 403-418.

THEODORO, S. H.; MANNING, D. A.; CARVALHO, A. M. X.; FERRÃO, F. R.; ALMEIDA, G. R. Soil remineralizer: A new route to sustainability for Brazil, a giant exporting agro-mineral commodities. In: ROUTLEDGE Handbook of the Extractive Industries and Sustainable Development. 2022. p. 261-281.

THEODORO, S. H.; PAULA MEDEIROS, F. de; IANNIRUBERTO, M.; BAIOCCHI JACOBSON, T. K. Soil remineralization and recovery of degraded areas: An experience in the tropical region. **Journal of South American Earth Sciences**, 103014, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103014>.

THEODORO, S. H.; PAULA MEDEIROS, F. de; IANNIRUBERTO, M.; JACOBSON, T. K. B. Soil remineralization and recovery of degraded areas: An experience in the tropical region. **Journal of South American Earth Science**, v. 107, 2021.

THEODORO, S. H.; SANDER, A.; BURBANO, D. F. M.; ALMEIDA, G. R. Rochas basálticas para rejuvenescer solos intemperizados. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 22, n. 37, p. 01-120, jan./jun. 2021.

THEODORO, S. H.; TCHOUANKOUE, J. P.; GONÇALVES, A. O.; LEONARDOS, O.; HARPER, J. A. Importância de uma Rede Tecnológica de Rochagem para a Sustentabilidade em Países Tropicais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n.6 p.1390-1407, 2012.

THEODORO, S. M. de C. H. **A Fertilização da Terra pela Terra: uma alternativa para a sustentabilidade do pequeno produtor rural**. 2000. 221 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) - Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Brasília, 2000.

TIQUIA, S. M.; TAM, N. F. Y. Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge. **Bioresource Technology**, v. 65, n. 1-2, p. 43-49, 1998.

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

VALENTE, B. S.; XAVIER, E. G.; MORSELLI, T. B. G. A.; JAHNKE, D. S.; BRUM-JÚNIOR, B. de S.; CABRERA, B. R.; MORAES; P. de O.; LOPES, D.C.N. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. **Archivos de Zootecnia**, v. 58, p. 59-85, 2009

VAN STRAATEN, P. **Agrogeology: The use of rock for crops**. London: Enviroquest Ltd., 2007. 440 p.

VAN STRAATEN, P. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, n. 4, p. 731-747, dez. 2006.

WALAN, P.; DAVIDSSON, S.; JOHANSSON, S.; HÖÖK, M. Phosphate rock production and depletion: Regional disaggregated modeling and global implications. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 93, p. 178-187, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.10.011>.

WANG, J. G.; ZHANG, F. S.; CAO, Y. P.; ZHANG, X. L. Effect of plant types on release of mineral potassium from gneiss. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 56, p. 37-44, 2020.

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

WINIWARTER, V.; BLUM, W. EH. From marl to rock powder: On the history of soil fertility management by rock materials. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 3, p. 316-324, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200625070>

WISTINGHAUSEN, C. von; SCHEIBE, W.; HEILMANN, H.;  
WISTINGHAUSEN, E. von; KÖNIG, U. J. **Manual para o uso dos preparados biodinâmicos**. São Paulo: Antroposófica, 2000.

WU, S.; LIU, Y.; SOUTHAM, G.; ROBERTSON, L. M.; WYKES, J., YI, Q., ... HUANG, L. Rhizosphere Drives Biotite-Like Mineral Weathering and Secondary Fe–Si Mineral Formation in Fe Ore Tailings. **ACS Earth and Space Chemistry**, v. 5, n. 3, p. 618-631, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.0c00331>.

ZHANG, Y.; HE, Y. Co-compostig solid swine manure with pine sawdust as organic substrate. **Bioresource Technology**, v. 97, p. 2024-2031, nov. 2006.

ZHAO, X.; GAO, S.; LU, D., WANG, H.; CHEN, X.; ZHOU, J.; ZHANG, L. Can Potassium Silicate Mineral Products Replace Conventional Potassium Fertilizers in Rice–Wheat Rotation? **Agronomy Journal**, v. 111, n. 4, p. 2075-2083, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2019.01.0020>.

