

## **Inovações na Fertilização do Solo e o Papel dos Remineralizadores**

**Luiz Fernando dos Santos**

Doutorando em Ciências Ambientais, UnB, Brasil

luiz.santos1@educa.go.gov.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9689-2300>

**Ewerton Gonçalves de Abrantes**

Doutor, Embrapa Cerrados

ewertonagro@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4649-7564>

**Giuliano Marchi**

Doutor, Embrapa Cerrados

giuliano.marchi@embrapa.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2887-790X>

**Éder de Souza Martins**

Doutor, Embrapa Cerrados

eder.martins@embrapa.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2881-683X>

Submissão: 24/04/2025

Aceite: 23/06/2025

SANTOS , Luiz Fernando dos; ABRANTES, Ewerton Gonçalves de; MARCHI , Giuliano; MARTINS , Éder de Souza. Inovações na Fertilização do Solo e o Papel dos Remineralizadores. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*, [S. l.], v. 21, n. 1, 2025. DOI: [10.17271/1980082721120255744](https://doi.org/10.17271/1980082721120255744).

Disponível em: [https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum\\_ambiental/article/view/5744](https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/5744).

Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## Inovações na Fertilização do Solo e o Papel dos Remineralizadores.

### RESUMO

**Objetivo** – Revisar o papel dos remineralizadores de solo (REM) na fertilidade de solos tropicais, com foco na CTC, no carbono orgânico e no potencial de mitigação ambiental.

**Metodologia** – Revisão bibliográfica em bases científicas (Web of Science e Google Acadêmico), com seleção de estudos sobre REM, CTC e dinâmica do carbono.

**Originalidade/relevância** – O estudo aborda lacunas sobre a geração de cargas e a estabilidade do carbono em solos tropicais com REM, destacando sua relevância para a agricultura sustentável.

**Resultados** – Os REM aumentam a CTC, melhoram a disponibilidade de nutrientes e contribuem para a estabilização do carbono no solo.

**Contribuições teóricas/metodológicas** – Avanço na compreensão dos processos de biointemperismo e da interação entre minerais e matéria orgânica no solo.

**Contribuições sociais e ambientais** – Redução da dependência de insumos químicos, incentivo à rochagem e mitigação de impactos ambientais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sustentabilidade agrícola. Manejo de Solos. Pó-de-rocha

## Innovations in Soil Fertilization and the Role of Remineralizers.

### ABSTRACT

**Objective** – To review the role of soil remineralizers (REM) in tropical soil fertility, focusing on CEC, organic carbon, and environmental mitigation potential.

**Methodology** – Literature review using scientific databases (Web of Science and Google Scholar), selecting studies on REM, CEC, and carbon dynamics.

**Originality/relevance** – The study addresses gaps in understanding charge generation and carbon stability in tropical soils amended with REM, highlighting its relevance for sustainable agriculture.

**Results** – REM increase CEC, improve nutrient availability, and contribute to carbon stabilization in soils.

**Theoretical/methodological contributions** – Advances in the understanding of biow weathering and mineral-organic matter interactions in soils.

**Social and environmental contributions** – Reduction in dependence on chemical inputs, promotion of rock-based agriculture, and mitigation of environmental impacts.

**KEYWORDS:** Agricultural sustainability. Soil management. Rock powder

## Innovaciones en la fertilización del suelo y el papel de los remineralizantes.

### RESUMEN

**Objetivo** – Revisar el papel de los remineralizadores del suelo (REM) en la fertilidad de suelos tropicales, con énfasis en la CTC, el carbono orgánico y el potencial de mitigación ambiental.

**Metodología** – Revisión bibliográfica en bases científicas (Web of Science y Google Académico), seleccionando estudios sobre REM, CTC y dinámica del carbono.

**Originalidad/relevancia** – El estudio aborda vacíos sobre la generación de cargas y la estabilidad del carbono en suelos tropicales con REM, destacando su relevancia para la agricultura sostenible.

**Resultados** – Los REM aumentan la CTC, mejoran la disponibilidad de nutrientes y contribuyen a la estabilización del carbono en el suelo.

**Contribuciones teóricas/metodológicas** – Avances en la comprensión del biow weathering y de la interacción entre minerales y materia orgánica en el suelo.

**Contribuciones sociales y ambientales** – Reducción de la dependencia de insumos químicos, fomento de la remineralización y mitigación de impactos ambientales.

**PALABRAS-CLAVE:** Sostenibilidad agrícola. Manejo de suelos. Polvo de roca

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 PRÁTICAS AGRÍCOLAS TRADICIONALISTAS E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS

A agricultura desempenha um papel central no desenvolvimento da civilização, adaptando-se ao longo do tempo para atender às crescentes demandas populacionais. Inicialmente, as técnicas de fertilização do solo envolviam materiais orgânicos, como cinzas e ossos de animais, refletindo um entendimento ecológico de reciclagem de nutrientes de maneira sustentável (Ciceri, 2015). Contudo, a Revolução Verde trouxe uma transformação profunda, com a introdução de fertilizantes sintéticos, impulsionada pela síntese de amônia pelo processo Haber-Bosch, aumentando significativamente a produtividade agrícola, especialmente após a Segunda Grande Guerra e a partir dos anos 1950 (Heffer & Prudd'homme, 2013).

Embora a aplicação intensiva de fertilizantes sintéticos tenha resultado em ganhos expressivos de produtividade, sua adoção irrestrita trouxe desafios ambientais e econômicos significativos. Pode-se verificar na figura 1 a evolução de importação de fertilizantes solúveis no Brasil. A dependência desses insumos levou à importação de aproximadamente 85% dos fertilizantes consumidos no país em 2023, totalizando quase 40 milhões de toneladas (ANDA, 2024). Além disso, o uso excessivo de fertilizantes solúveis, a agricultura convencional e a pecuária extensiva contribuíram para a degradação da matéria orgânica do solo, acidificação, lixiviação de nutrientes e emissão de gases de efeito estufa (Buss et al., 2024; Glorieux & Delmelle, 2022; Lopes et al., 2013). A monocultura intensiva, amplamente sustentada pelo uso desses fertilizantes, também resultou na compactação do solo e na redução da biodiversidade microbiana, impactando sua fertilidade e resiliência a médio e longo prazo (Derpsch, et al., 2024).

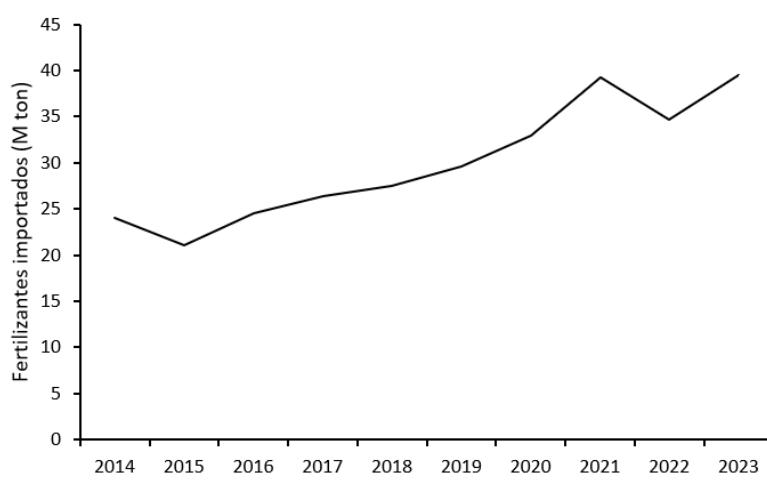
Diante desse cenário, a remineralização de solos surge como uma alternativa promissora para reduzir a dependência de insumos importados e mitigar os impactos ambientais da agricultura convencional. Os **remineralizadores de solo (REM)** são insumos minerais derivados de rochas silicáticas que passaram apenas por processos mecânicos de britagem e moagem, sem alterações químicas ou térmicas significativas, e cuja aplicação visa melhorar as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (Martins et al., 2023). Diferentemente dos fertilizantes sintéticos, que fornecem nutrientes de forma imediata e altamente solúvel, os REM liberam nutrientes de maneira gradual, favorecendo a absorção eficiente pelas plantas e reduzindo perdas por lixiviação.

Além dos benefícios agronômicos diretos, os REM desempenham um papel fundamental na estabilização da matéria orgânica do solo e no aumento da capacidade de troca de cátions (CTC), impactando positivamente a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas (Crusciol et al., 2022). Estudos indicam que a aplicação desses insumos pode contribuir para a formação de novas fases minerais com elevada carga superficial, promovendo maior interação entre a fração mineral e a matéria orgânica, o que potencializa a fixação de carbono no solo (Santos et al., 2021). Assim, o uso estratégico dos remineralizadores não apenas melhora a fertilidade do solo, mas também atua como um mecanismo de sequestro de

carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

A dependência de fertilizantes sintéticos representa um dos maiores desafios para a soberania agrícola brasileira, uma vez que insumos como cloreto de potássio (KCl) e fosfatos são amplamente importados de países como Rússia, Canadá e Marrocos (Al Rawashdeh, 2020). A volatilidade do mercado internacional e os riscos geopolíticos tornam essa dependência um fator de vulnerabilidade econômica, impactando diretamente os custos de produção agrícola.

Figura 1 - Evolução das importações de fertilizantes industriais (em megatoneladas) no Brasil no decênio 2014-2023



Fonte: (ANDA, 2024).

Nesse contexto, o aproveitamento de **insumos locais e regionais** para o manejo da fertilidade do solo surge como uma alternativa viável e sustentável. O Brasil possui uma vasta diversidade geológica que permite o uso de rochas silicáticas como fontes regionais de nutrientes essenciais. Diferentemente dos fertilizantes convencionais, que são altamente solúveis e sujeitos a perdas por lixiviação, os remineralizadores apresentam uma dissolução gradual, permitindo um fornecimento contínuo de elementos como cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e silício (Si), fundamentais para o crescimento das plantas e a melhoria das propriedades físico-químicas do solo (Martins et al., 2023).

Os insumos regionais incluem uma variedade de materiais geológicos com potencial agrícola, como basaltos, biotita sienitos, biotita xistos e fonolitos, que possuem teores significativos de elementos nutritivos e elevada reatividade química e biológica. Estudos indicam que os minerais presentes nesses remineralizadores interagem com a biota do solo, favorecendo processos de intemperismo biológico e estimulando a liberação gradual de nutrientes ao longo do tempo (Swoboda et al., 2022). Além disso, a utilização desses insumos reduz a pegada de carbono associada ao transporte de fertilizantes importados, fortalecendo cadeias produtivas locais e promovendo a economia circular na agricultura.

A adoção dos REM em solos tropicais, como os Latossolos altamente intemperizados, representa uma oportunidade única para melhorar a fertilidade do solo de maneira sustentável.

Estudos demonstram que a aplicação de remineralizadores pode modificar a proporção de cargas variáveis e permanentes no solo, aumentando a CTC e proporcionando maior eficiência na retenção de nutrientes (Santos et al., 2021). Além disso, a interação entre minerais frescos e a rizosfera das plantas estimula a atividade microbiana benéfica, criando um ciclo virtuoso de melhoria da qualidade do solo e aumento da produtividade agrícola (Bhattacharyya & Furtak, 2022).

A transição para um modelo de manejo da fertilidade do solo incorpora os remineralizadores a reavaliação das práticas agrícolas prejudiciais e à adoção de abordagens mais integradas e regionais. O processo se inicia com o biointemperismo, no qual os minerais primários (originais da rocha) são transformados por ação biológica em novos minerais (Krahl et al., 2022). Esses minerais, frequentemente em fases de transição, apresentam características como hidratação, estrutura amorfa e natureza, exigindo em maior CTC e área superficial específica (ASE) em comparação aos minerais primários. Assim, além de fornecer nutrientes essenciais de forma gradual, os remineralizadores estimulam processos de intemperismo e biointemperismo, favorecendo a formação de novas fases minerais com carga elevada superficial e melhorando a CTC do solo (Santos et al., 2021). A lixiviação rápida reduz sua eficiência e contribui para impactos ambientais negativos (Martins et al., 2023). Dessa forma, para melhores resultados nos atributos químicos de solos tratados com REM, a atividade biológica é essencial (Martins et al., 2023). A ação dos remineralizadores vai além do fornecimento gradual de nutrientes, estando diretamente ligada às condições edafoclimáticas e à microbiota do solo. Microrganismos, como fungos e bactérias, intensificam o biointemperismo, promovendo a liberação de elementos essenciais e favorecendo a retenção de cátions, o tamponamento químico e a mitigação da acidificação e lixiviação excessiva (Uroz et al., 2009). Além disso, remineralizadores ricos em silicatos podem estabilizar o carbono orgânico ao formar associações organo-minerais, contribuindo para o sequestro de carbono e a melhoria da estrutura do solo (Zinn et al., 2005). Desta forma, sua utilização não deve ser vista apenas como uma alternativa aos fertilizantes solúveis, mas como uma estratégia integrada para a sustentabilidade agrícola, promovendo a biodiversidade do solo e a sinergia entre minerais e microrganismos. Aliados a práticas como rotação de culturas e adição de matéria orgânica, os REM podem fortalecer sistemas agrícolas mais resilientes (Ramos et al., 2022).

A implementação desses insumos deve ser pautada em critérios científicos sólidos, considerando a composição química e mineralógica dos remineralizadores, bem como sua granulometria e reatividade. Estudos indicam que rochas silicáticas moídas, como basaltos, biotita sienitos e fonolitos, podem aumentar a disponibilidade de potássio e outros nutrientes essenciais sem os efeitos adversos associados aos fertilizantes sintéticos (Crusciol et al., 2022; Luchese et al. 2023). Além disso, a utilização desses insumos tem demonstrado potencial para estabilizar o carbono orgânico do solo, auxiliando na mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> e na construção de sistemas agrícolas mais resilientes às mudanças climáticas (Swoboda et al., 2022).

A adoção dos REM deve ser integrada a outras práticas sustentáveis, como rotação de culturas, sistemas de plantio direto e uso de adubação orgânica, favorecendo a sinergia entre minerais, matéria orgânica e microbiota do solo. A interação entre os REM e a biota do solo

desempenha um papel fundamental na disponibilização dos nutrientes, pois o processo de biointemperismo promovido pela rizosfera acelera a dissolução dos minerais e a liberação de elementos essenciais às plantas (Krahl et al., 2022). Assim, um manejo eficiente deve levar em consideração não apenas a composição química dos insumos, mas também as condições biológicas e físicas do solo, garantindo sua plena funcionalidade ao longo do tempo.

Além dos benefícios agronômicos e ambientais, a valorização de insumos regionais contribui para a redução da dependência de fertilizantes importados, fortalecendo a autonomia dos produtores e promovendo um modelo de agricultura menos vulnerável às oscilações do mercado internacional (Manning & Theodoro, 2020). Com a regulamentação dos REM pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (Brasil, 2016) e a crescente aceitação desses insumos entre os agricultores, o Brasil se posiciona como referência global na implementação de práticas agrícolas baseadas na remineralização dos solos (Martins et al., 2024).

Dessa forma, a utilização estratégica dos REM pode representar um novo paradigma na agricultura brasileira, promovendo maior eficiência no uso dos recursos regionais e garantindo a sustentabilidade da produção agrícola no longo prazo. Ao integrar os conhecimentos geoquímicos, mineralógicos e biológicos sobre a remineralização de solos, este artigo busca contribuir para a compreensão dos mecanismos de ação desses insumos e sua aplicação prática na construção de sistemas agrícolas mais produtivos e resilientes.

## 1.2 OBJETIVOS

Este artigo tem como objetivo investigar, por meio de uma revisão de literatura, a importância do uso de remineralizadores de solo (REM) na agricultura, seus impactos para uma produção sustentável e a capacidade desses materiais de promover uma agricultura regenerativa. O estudo visa conectar as informações sobre a fertilidade, capacidade de troca catiônica (CTC) e estabilização do carbono orgânico em solos tratados com REM, além do potencial para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, especialmente no contexto da agricultura tropical.

## 2. METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos, foi realizada uma revisão de literatura abrangente, consultando as bases de dados Web of Science e Google Acadêmico. Foram selecionados estudos que abordam a relação entre os minerais do solo e a capacidade de troca catiônica (CTC), bem como a influência dos REM nesse processo. O foco da análise incluiu alterações na CTC dos solos pelo efeito dos REM, que afeta a retenção de nutrientes essenciais como cálcio, magnésio e potássio no complexo de troca (Santos et al., 2021; Krahl et al., 2022; Medeiros et al., 2023). Além disso, foram incluídos na revisão estudos que discutem a estabilização do carbono orgânico no solo e o papel dos REM na mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Para a avaliação do carbono orgânico do solo (COS) e sua estabilização, foram analisados artigos que investigaram a dinâmica do COS em

relação a minerais de baixa cristalinidade e óxidos de ferro e alumínio, além da interação entre matéria orgânica e minerais do solo. Os critérios de seleção incluíram a metodologia para adsorção e dessorção de carbono orgânico dissolvido (DOC) e experimentos de campo que abordaram a estabilização do COS em diferentes condições de manejo e tipos de solo. A escolha dos estudos considerou a profundidade da análise, a adequação das técnicas experimentais e a pertinência das conclusões para entender os impactos dos remineralizadores na estabilização do COS. A análise também incluirá a discussão sobre como essas práticas podem transformar o manejo dos solos tropicais, proporcionando uma agricultura mais resiliente e adaptada às mudanças climáticas globais (Bottoni et al. 2024).

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1 CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIONS**

A CTC é uma medida fundamental que indica a capacidade do solo de reter e trocar cátions, que são íons, como o potássio, ou moléculas carregadas positivamente, como o amônio, e essenciais para a nutrição das plantas. Solos com alta CTC podem reter uma maior quantidade de nutrientes catiônicos e, portanto, são mais férteis e mais capazes de sustentar o crescimento das plantas. A CTC é influenciada pela quantidade, pelo tipo de argila e matéria orgânica presentes, bem como pelo pH do solo (Sposito, 2008).

As cargas no solo, que formam a CTC, podem ser divididas em duas categorias principais: cargas permanentes e cargas variáveis. As cargas permanentes são geralmente associadas à estrutura cristalina dos minerais de argila, onde ocorrem substituições isomórficas e bordas quebradas nos minerais que resultam em um desequilíbrio de cargas elétricas. Por outro lado, as cargas variáveis surgem devido à adsorção ou liberação de íons  $H^+$  e  $OH^-$  nas superfícies dos minerais de argila e matéria orgânica, sendo altamente dependentes do pH do meio (Parks & Bruyn, 1962; Sposito, 1984).

A formação de cargas elétricas nos solos, portanto, resulta principalmente de dois mecanismos distintos, que envolvem uma combinação de fatores químicos e físicos das superfícies minerais. Primeiramente, ocorre a substituição isomórfica de íons de alta valência por íons de menor valência nas camadas estruturais dos minerais secundários. Por exemplo, a substituição de  $Si^{4+}$  por  $Al^{3+}$  em grupos siloxanos gera cargas elétricas estruturais (permanentes), conhecidas como  $\sigma_p$  (Bollan et al., 1999; Fontes et al., 2001; Sposito, 2008). Este processo confere às superfícies uma carga líquida negativa, o que facilita a atração eletrostática de cátions metálicos. Além disso, a variação do pH do ambiente promove a formação de cargas elétricas variáveis através da protonação ou desprotonação de grupos hidroxila ( $OH^-$ ) nas superfícies minerais. Óxidos metálicos e bordas de cristalitos de filossilicatos são frequentemente envolvidos neste tipo de carga, conhecida como  $\sigma_H$ . À medida que o pH diminui, a protonação de grupos funcionais presentes na

superfície dos minerais e na matéria orgânica do solo, como hidroxilas em óxidos de ferro e alumínio, e grupos carboxílicos e fenólicos na matéria orgânica, aumenta a carga líquida positiva do sistema. Esse processo favorece a retenção de ânions, como fosfatos, sulfatos e ácidos orgânicos, por meio de interações eletrostáticas e ligações específicas (Sposito, 2008; Mikutta et al., 2007). Além disso, essas cargas influenciam a adsorção e estabilização de moléculas orgânicas, modulando sua mobilidade no perfil do solo e impactando processos como a retenção de carbono e a disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas.

Os mecanismos de adsorção organomineral, influenciados pela química da superfície do mineral, podem ser agrupados em diferentes categorias de acordo com a carga presente nas superfícies minerais. Superfícies com carga variável, como óxidos de ferro e alumínio, podem interagir com a matéria orgânica tanto por meio de cargas positivas quanto negativas, dependendo do pH e da composição da solução do solo (Schneider et al., 2010). Por exemplo, em solos ácidos, hidróxidos amorfos de alumínio apresentam carga positiva, favorecendo a adsorção de produtos orgânicos aniónicos, como ácidos carboxílicos e fenólicos, através de interações eletrostáticas e ligações de troca ligante (Mikutta et al., 2007). Além disso, as superfícies minerais certamente podem estabilizar a matéria orgânica ao reduzir sua destruição microbiana, tornando os compostos orgânicos menos acessíveis às enzimas degradativas (Newcomb et al., 2017). Por outro lado, as superfícies minerais com carga negativa, como as de filossilicatos, também desempenham um papel fundamental na estabilização da matéria orgânica. Estudos indicam que cargas negativas podem promover a retenção de moléculas orgânicas por meio de interações catiônicas e pontes de proteção, além de interações específicas entre grupos funcionais de matéria orgânica e sítios reativos da superfície mineral (Newcomb et al., 2017). Esses mecanismos reforçam a ideia de que a estabilização da matéria orgânica não ocorre exclusivamente por adsorção a cargas negativas, mas resulta de um complexo equilíbrio entre diferentes tipos de interações químicas e físicas na interface organomineral.

A presença de substituição isomórfica em muitos filossilicatos gera superfícies com cargas permanentes negativas, enquanto a ausência dessa substituição em outros minerais, como alguns filossilicatos 2:1 e minerais do grupo da caulinita, resulta em superfícies eletrostaticamente neutras. Os filossilicatos 2:1, como esmectitas, vermiculitas e ilitas, possuem uma estrutura cristalina composta por duas camadas tetraédricas de silício intercaladas por uma camada octaédrica de alumínio ou magnésio, conferindo-lhes elevada capacidade de troca catiônica e expansibilidade variável (Theng, 2018), além de substituição isomórfica na camada octaédrica e tetraédrica, que gera cargas permanentes no solo. Por outro lado, minerais do grupo caulim, como caulinita e haloisita, apresentam estrutura cristalina do tipo 1:1, caracterizada pela repetição de uma única camada tetraédrica de silício combinada com uma camada octaédrica de alumínio. Essa configuração estrutural resulta em menor incidência de substituições isomórficas, o que, por sua vez, reduz a presença de cargas permanentes na superfície desses minerais (Souza Junior et al., 2007; Pereira et al., 2021). Como consequência, os minerais do grupo caulim possuem superfícies

eletricamente neutras e baixa capacidade de troca catiônica, tornando-se menos reativos para a adsorção de íons e moléculas orgânicas quando comparados aos filossilicatos do tipo 2:1.

Embora as cargas negativas sejam tradicionalmente associadas à estabilização da matéria orgânica do solo, estudos demonstram que cargas positivas também desempenham um papel crucial nesse processo. Em solos ácidos, minerais como óxidos de ferro (goethita, hematita) e alumínio (gibbsita) apresentam cargas positivas devido à protonação de seus grupos hidroxila, favorecendo interações eletrostáticas com compostos orgânicos carregados negativamente, como ácidos carboxílicos e fenólicos (Schneider et al., 2010). Além disso, a estabilização da matéria orgânica ocorre por outros mecanismos além das interações eletrostáticas, incluindo a formação de complexos covalentes entre grupos funcionais orgânicos e superfícies minerais. A ligação de fosfatos, por exemplo, pode competir diretamente com a adsorção de matéria orgânica, influenciando sua estabilização e disponibilidade no solo (Spohn et al., 2021).

A interação entre fósforo e minerais do solo tem implicações fundamentais para a dinâmica da fertilidade e da estabilidade da matéria orgânica. O fósforo pode formar ligações covalentes fortes com óxidos de ferro e alumínio, reduzindo sua disponibilidade para as plantas, enquanto também influencia a adsorção e a liberação de matéria orgânica dissolvida. Estudos demonstram que a adição de fosfato ao solo pode causar a desestabilização da matéria orgânica previamente adsorvida, aumentando a concentração de carbono orgânico dissolvido e potencializando sua mineralização. Esse fenômeno é particularmente relevante em solos altamente intemperizados, como os Latossolos, onde a competição entre fósforo e compostos orgânicos por sítios de adsorção nos minerais pode alterar significativamente os processos de sequestro de carbono no solo (Spohn et al., 2021).

Além disso, a compreensão dessas interações é crucial para avaliar a dinâmica dos minerais nos remineralizadores e seus efeitos na carga superficial e na CTC do solo, fatores determinantes para a reatividade e estabilidade dos compostos orgânicos. Estudos mostram que a carga permanente de minerais primários, como feldspatos, varia conforme sua composição e estrutura cristalina (Kleber et al., 2021). Minerais secundários, como argilas expansivas do tipo 2:1, apresentam maior CTC devido à presença de cargas negativas permanentes associadas às substituições isomórficas. Vermiculita e montmorilonita, por exemplo, possuem elevada carga permanente, enquanto a caulinita, com baixa CTC, apresenta apenas cargas variáveis (Churchman & Lowe, 2012). Óxidos de ferro e alumínio, como goethita e gibbsita, possuem baixa CTC, mas formam ligações fortes com matéria orgânica e fósforo, modulando a disponibilidade desses elementos no solo (quadro 1).

O potencial dos remineralizadores como o Sienito e outros podem contribuir para a geração de novas cargas na fração mineral do solo, aumentando sua capacidade de retenção de cátions e mitigando essas perdas (Martins et al., 2023).

**Quadro 1 - Parâmetros de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Área Superficial Específica (ASE) de Minerais de Argila**

Minerais	Tipo	op (mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	oH (mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	CTC (mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	ASE (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )
Caulinita	1:1	-	20 <sup>(1)</sup>	0 a 80 <sup>(2)</sup>	7 a 80 <sup>(1)</sup>
Gibbsita	1:1	-	20 <sup>(1)</sup>	variável com pH <sup>(2)</sup>	1 a 100 <sup>(1)</sup>
Goethita	1:1	-	0 a 150 <sup>(1)</sup>	variável com pH <sup>(2)</sup>	40 a 90 <sup>(1)</sup>
Vermiculita	2:1	140 <sup>(4)</sup>	180 a 220 <sup>(4)</sup>	1200 a 1500 <sup>(2)</sup>	600 a 800 <sup>(2)</sup>
Montmorilonita	2:1	700 <sup>(3)</sup>	110 <sup>(3)</sup>	800 a 1200 <sup>(2)</sup>	650 a 800 <sup>(2)</sup>
Illita	2:1	105 <sup>(3)</sup>	40 a 120 <sup>(3)</sup>	100 a 400 <sup>(2)</sup>	20 a 200 <sup>(1)</sup>
Alofana	amorfo	-	0 a 1000 <sup>(1)</sup>	variável com pH <sup>(2)</sup>	700 a 900 <sup>(1)</sup>

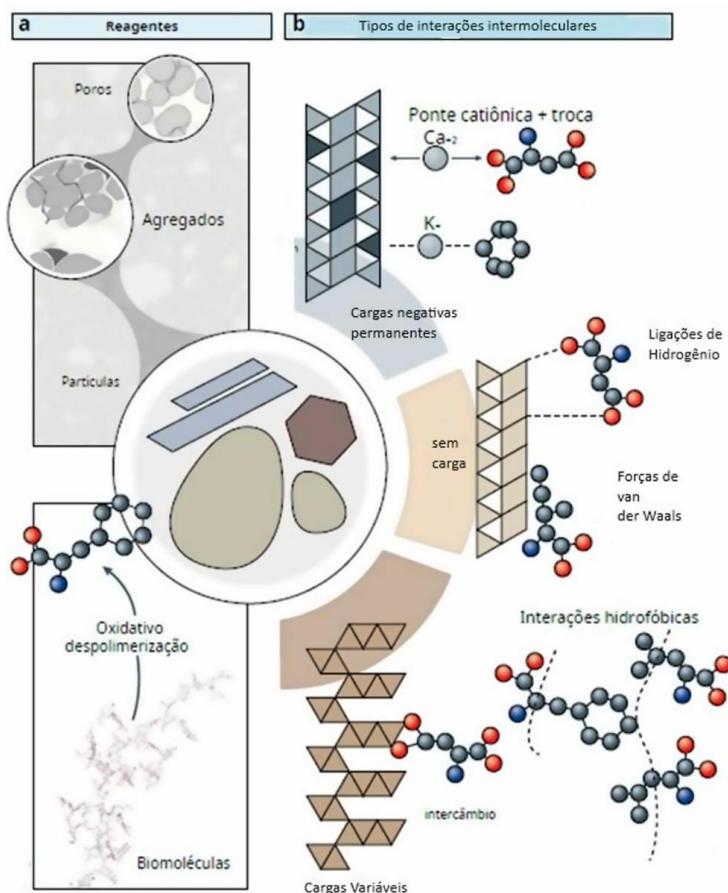
(1) Kleber et al., (2021); (2) Churchman e Lowe (2012); (3) Anderson e Sposito (1991); (4) Barshad (1948); (-) indefinido

Além disso, a adsorção de césio (Cs<sup>+</sup>) tem sido utilizada como método para quantificar cargas permanentes nos solos, permitindo a estimativa da reatividade mineral em diferentes condições edafoclimáticas. Estudos relatam valores de carga permanente variando entre 5,0 e 65,6 mmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> em Latossolos e Argissolos, evidenciando a heterogeneidade mineralógica e suas implicações para a fertilidade do solo (Weber et al., 2005; Busato et al., 2012; Cunha et al., 2014).

Nesse contexto, a perda de nutrientes por lixiviação para camadas mais profundas do solo que ocorrem corre porque solos altamente intemperizados, como os Latossolos, são devidos a estes apresentam baixa saturação de bases devido à predominância de cargas variáveis provenientes de óxidos de alumínio e ferro, o que favorece a mobilidade de nutrientes essenciais, como cálcio, magnésio e potássio, especialmente sob condições de altas variações (Weber 2005; Santos et al., 2018).

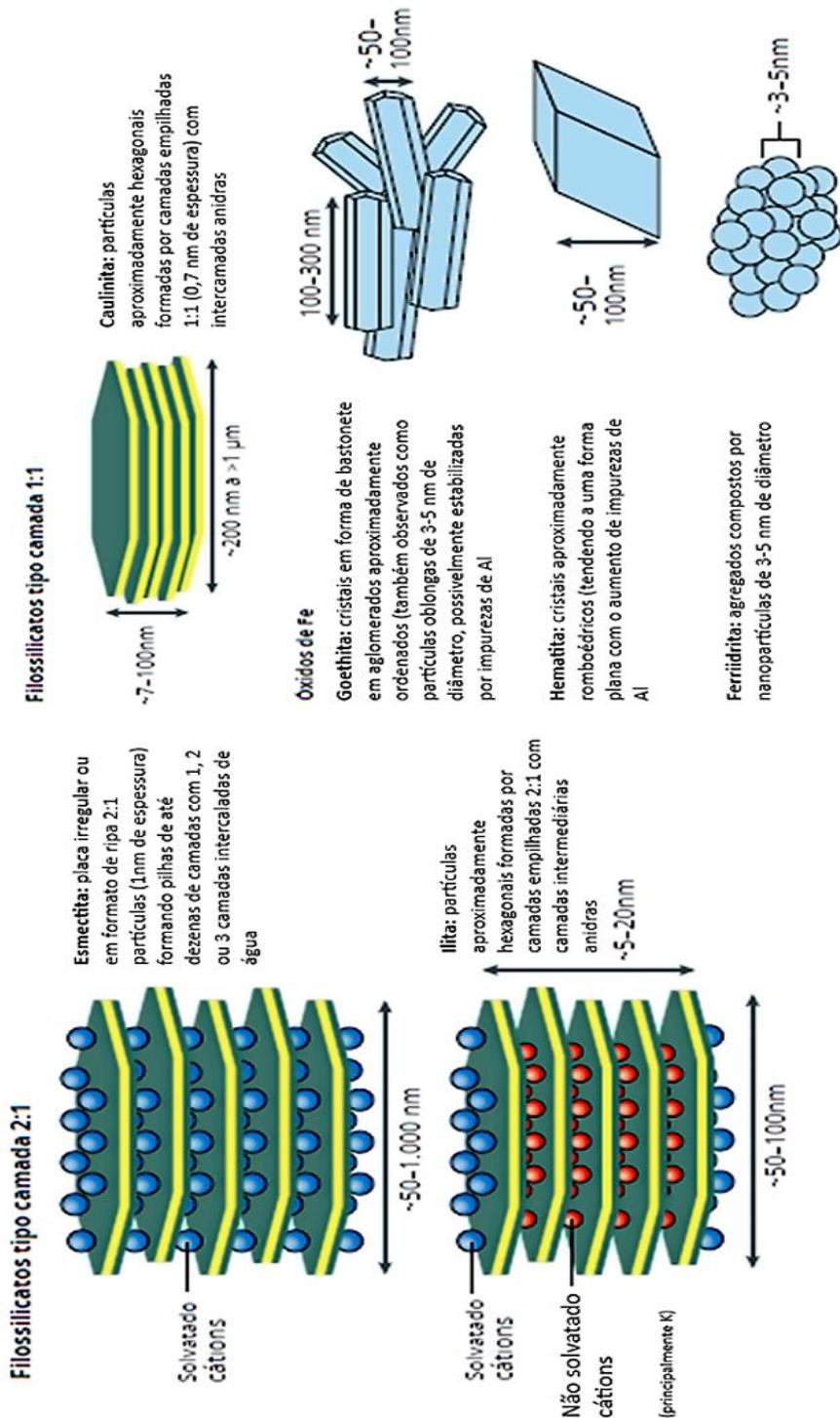
Os Latossolos do bioma Cerrado são reconhecidos por sua baixa fertilidade natural, limitada capacidade de troca catiônica (CTC) e elevada acidez. Essas características decorrem principalmente da mineralogia dos solos, com destaque para os minerais de camada 1:1, como goethita, hematita e gibbsita, óxidos de ferro e alumínio formados pelo intenso intemperismo químico em condições tropicais (Fontes et al., 2001; Alleoni et al., 2009). Esses minerais possuem poucos sítios de troca catiônica disponíveis, resultando em uma CTC reduzida. A alta contribuição da matéria orgânica, favorecida pelas altas temperaturas e umidade do Cerrado, contribui para a diminuição da sua contribuição para o CTC (Sposito, 2008). Estudos como o de Tan e Dowling (1984), que removeram a matéria orgânica utilizando peróxido de hidrogênio, demonstraram que essa remoção causou uma redução significativa no CTC, evidenciando a importância das cargas associadas aos grupos ativos orgânicos na retenção de cátions (Figuras 2 e 3). A CTC residual após a remoção da matéria orgânica ficou associada principalmente às cargas permanentes das argilas minerais, como a caulinita e os óxidos de ferro e alumínio, confirmando a capacidade limitada de retenção de nutrientes desses solos. Nesse contexto, a mineralogia dos Latossolos, particularmente os minerais de camada 1:1, tem um papel crucial na determinação da fertilidade e da capacidade de absorção de nutrientes como o fósforo (Essington, 2003; Uehara e Gillman, 1980). Estratégias de manejo, como a aplicação de calcário e a preservação da matéria orgânica, são essenciais para melhorar a fertilidade e aumentar a produtividade desses solos (Reatto e Martins, 2005; Wilcke e Lilienfein, 2005).

Figura 2: Ligantes orgânicos em interfaces minerais.



- a) As interfaces minerais surgem em uma variedade de escalas espaciais e topográficas em solos e sedimentos, onde ligantes orgânicos anfifílicos de baixo peso molecular pode alcançar a interface sólido-solução. b) Uma vez próximos, os ligantes podem aderir às superfícies minerais por meio de um ou vários mecanismos de complexação, com base na distribuição de carga superficial permanente e variável e na reatividade estrutural (Kleber et al., 2021)

Figura 3 - Estrutura geométricas de argilominerais encontrados nos solo



Fonte: Kleber et al., 2021.

A aplicação de biotita sienito finamente moído em um Latossolo do Cerrado resultou no aumento dos níveis de fósforo e possíveis disponíveis, além da elevação das cargas permanentes, favorecendo a nutrição do milho (Santos et al., 2021). As cargas permanentes, por sua vez, são intrínsecas à estrutura mineral e não variam com as condições ambientais (Cunha et al., 2014), enquanto as cargas dependentes do pH influenciam diretamente a capacidade de troca de cátions (CTC), afetando a retenção de nutrientes conforme o pH, teor de argila e matéria orgânica do solo (Bortoluzzi et al., 2005). Dessa forma, a interação entre mineralogia, matéria orgânica e práticas de manejo, como cálculo e remineralização, é essencial para otimizar a fertilidade dos Latossolos do Cerrado.

### **3.2 Remineralizadores e a Relação com o CTC**

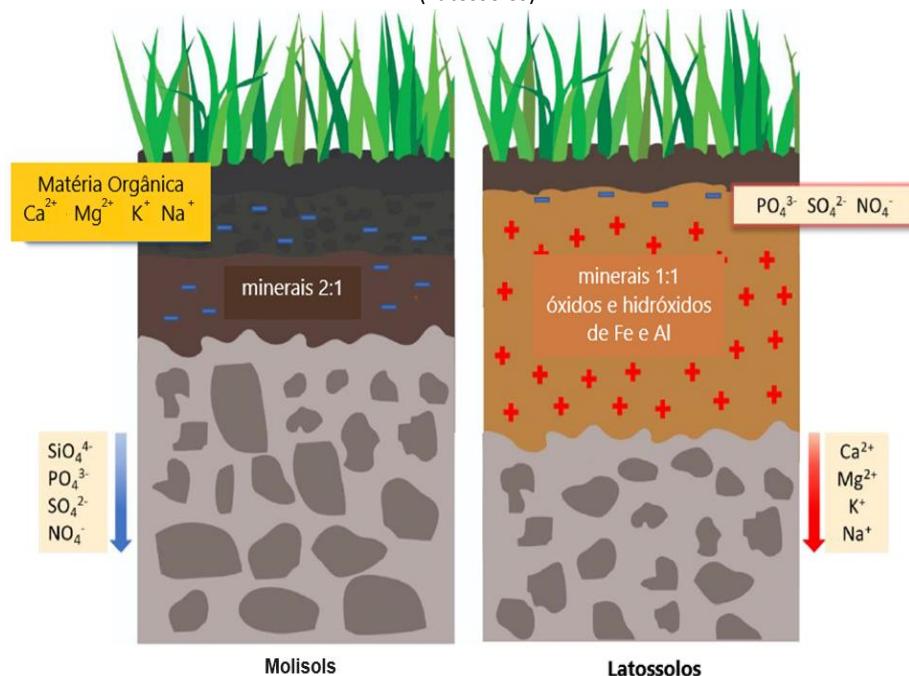
Os Remineralizadores de solo (REM), conforme definido pela legislação brasileira (Lei nº 12.890, de 2013), são materiais de origem mineral moídos mecanicamente que apresentam grande potencial para melhorar a capacidade de troca de cátions (CTC) dos solos, promovendo maior manutenção de nutrientes e tornando uma agricultura mais sustentável ao reduzir a dependência de fertilizantes solúveis (Hinsinger et al., 2001; Bakken et al., 2000; Duarte et al., 2013). A eficácia do REM na fertilidade do solo está diretamente relacionada à sua mineralogia e à formação de novas fases minerais ao longo do tempo. O processo de moagem das rochas reduz o tamanho das partículas, expondo novas superfícies reativas e aumentando a área superficial específica (ASE). Essa ampliação favorece a interação entre os minerais e a solução do solo, intensificando reações de intemperismo químico e promovendo a liberação gradual de nutrientes essenciais.

A rizosfera tem um papel fundamental nesse processo, pois a exsudação de compostos orgânicos pelas raízes e a atividade microbiana alteram a dinâmica química ao redor das partículas do REM. Ácidos orgânicos, como ácido cítrico e ácido oxálico, são liberados pelas raízes e atuam na dissolução dos minerais primários, complexando cátions e mobilizando nutrientes como potássio, cálcio e magnésio (Taiz e Zeiger, 2013). Além disso, a preservação da matéria orgânica no solo gera CO<sub>2</sub>, que ao reagir com a água do solo forma ácido carbônico, promovendo o intemperismo dos minerais do REM e facilitando a liberação progressiva de elementos essenciais. Com o avanço do intemperismo, os minerais primários do REM passam por transformações estruturais e químicas, levando à formação de minerais secundários, como vermiculita e hidrobiotita. Esses minerais possuem cargas permanentes e derivadas diretamente para o aumento da CTC do solo. Além disso, a formação de minerais amorfos e de baixa cristalinidade confere maior reatividade química ao sistema, melhorando a retenção de cátions e proporcionando melhorias nos atributos físico-químicos do solo (Krahul et al., 2022).

A mineralogia dos Latossolos, caracterizada predominantemente por minerais de camada 1:1, tem um papel crucial na capacidade de retenção de nutrientes (Figura 4). Devido à predominância de caulinita e óxidos de ferro e alumínio, esses solos possuem uma CTC naturalmente baixa e alta suscetibilidade à lixiviação de cátions essenciais. Estratégias de manejo, como a aplicação de calcário e a preservação da matéria orgânica, são fundamentais para melhorar sua fertilidade e produtividade (Essington, 2003; Uehara e Gillman, 1980; Reatto e Martins, 2005; Wilcke e Lilienfein, 2005).

Nesse contexto, o uso do REM pode complementar essas estratégias ao fornecer minerais essenciais que repõem estoques de nutrientes esgotados ao longo do tempo. Ao liberar gradualmente cátions como potássio, cálcio e magnésio, os remineralizadores aumentam a disponibilidade desses elementos no solo, diminuindo perdas por lixiviação e favorecendo a manutenção de nutrientes na fração mineral. Esse efeito é particularmente relevante em solos tropicais altamente intemperizados, onde o baixo CTC e a rápida remoção de cátions representam um desafio para a fertilidade do solo (Manning & Theodoro, 2020; Krahl et al., 2022; Martins et al., 2023). Assim, a aplicação de remineralizadores pode contribuir para um manejo mais eficiente da fertilidade do solo, fornecendo um fornecimento gradual de nutrientes e promovendo a estabilidade química do sistema agrícola ao longo do tempo.

Figura 4 - Principais características dos solos agrícolas de clima temperado (Molisols - Chernossolo) e tropical (Latossolos).

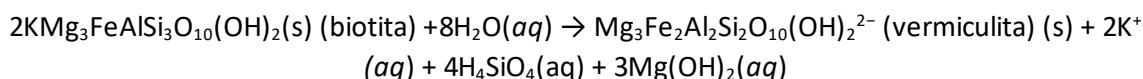


Fonte: Krahl et al., 2022.

Foi verificada a influência de diferentes dosagens de biotita-sienito em Latossolo Vermelho-Amarelo em casa de vegetação e encontraram que, sem a adição de remineralizador, as cargas variáveis predominavam, compondo 20 mmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de solo enquanto as cargas permanentes eram de 5 mmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de solo (Santos et al., 2021). Esses valores de cargas superficiais são semelhantes ao encontrado em outros trabalhos que também usaram o método de adsorção de Cs<sup>+</sup> para a quantificação dessas cargas em Latossolos. (Busato et al., 2012; Weber et al., 2005). A adição de remineralizador aumentou significativamente as cargas permanentes na maior dosagem utilizada (2,4 ton ha<sup>-1</sup>), mantendo-se elevadas após o primeiro ciclo de cultivo de milho, sem alterar as cargas variáveis (Santos et al., 2021). Esse aumento pode ser explicado pela moagem da rocha, que amplia a área superficial dos minerais, e pela ação bioquímica da rizosfera, que libera íons e forma novos minerais com cargas permanentes (equação 1). Embora

a dissolução do remineralizador seja lenta e não altere significativamente os teores totais de  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  no solo, as frações solúveis desses elementos podem aumentar quando comprovadas por extratores químicos. Essa mobilização pode depender da disponibilidade de nutrientes e da formação de novos compostos no solo. Além disso, a presença de argilominerais 2:1 e 1:1 pode aumentar as cargas negativas, contribuindo para a retenção de cátions e prejudiciais às perdas por lixiviação. No entanto, devido às baixas dosagens aplicadas, as transformações minerais promovidas pelos remineralizadores podem ocorrer em situações abaixo do limite de detecção e determinação de técnicas instrumentais diretas, como a difratometria de raios X (DRX), que geralmente detecta apenas fases minerais presentes acima de 1% em massa (König et al., 2002). Desta forma, a caracterização da influência dos remineralizadores no solo requer abordagens indiretas, como a determinação da capacidade de troca catiônica (CTC), a avaliação do pH do solo, a análise da mineralogia do horizonte superficial e o monitoramento da dinâmica de nutrientes, como fósforo e potencial. Essas metodologias permitem uma compreensão mais detalhada dos efeitos da aplicação dos remineralizadores a longo prazo, mesmo quando as transformações minerais são sutis e não diretamente detectáveis por técnicas convencionais.

Porém, um experimento em casa de vegetação com ciclos sucessivos de milho e diferentes doses de remineralizadores misturados com areia, investigou a liberação de elementos e a formação de novos minerais pelo biointemperismo na rizosfera, utilizando rochas basálticas, biotita xisto e biotita sienito. Os resultados mostraram que as rochas moídas fornecem nutrientes às plantas, com elementos como K, Ca, Mg e outros presentes na matéria seca. A análise de DRX indicou que o basalto manteve sua mineralogia, enquanto o intemperismo da biotita resultou na formação de hidrobiotita, sendo mais pronunciado na biotita xisto, que também apresentou maior produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes. A CTC aumentou significativamente na biotita-xisto, o que é particularmente relevante para solos tropicais com baixa retenção de cátions. De acordo com a equação 1, o intemperismo da biotita pode levar à formação de vermiculita, um mineral com alta CTC e ASE (Acker & Bricker 1991; Holgersson et al., 2024; Krahl et al., 2022).



Equação 1 - Reação de transformação da biotita em vermiculita na presença de água: Esta equação descreve a reação química onde a biotita (um mineral de silicato) reage com água para formar vermiculita, íons potássio, ácido silícico e hidróxido de magnésio.

Esses resultados reforçam o potencial dos REM, especialmente os ricos em biotita, na melhoria da fertilidade dos solos tropicais, como demonstrado pelo aumento da CTC e pela maior produção de biomassa. A formação de novos minerais, como a hidrobiotita, indica que o biointemperismo induzido pelas plantas não só libera nutrientes essenciais, mas também promove mudanças nas propriedades físico-químicas do solo (Krahl et al., 2022; Martins et al., 2023).

Desta forma, o uso contínuo de REM pode atuar como uma estratégia complementar no manejo agrícola, contribuindo para a melhoria da disponibilidade de nutrientes ao longo do

tempo. Embora não substituam completamente os fertilizantes solúveis, esses materiais podem reduzir a necessidade de aplicações frequentes, promovendo uma nutrição mais equilibrada para as culturas e favorecendo práticas agrícolas mais sustentáveis. Esse avanço é particularmente relevante em regiões com solos altamente intemperizados, onde a baixa retenção de nutrientes representa um desafio constante.

### **3.3 CARBONO ORGÂNICO DO SOLO E SUA ESTABILIZAÇÃO**

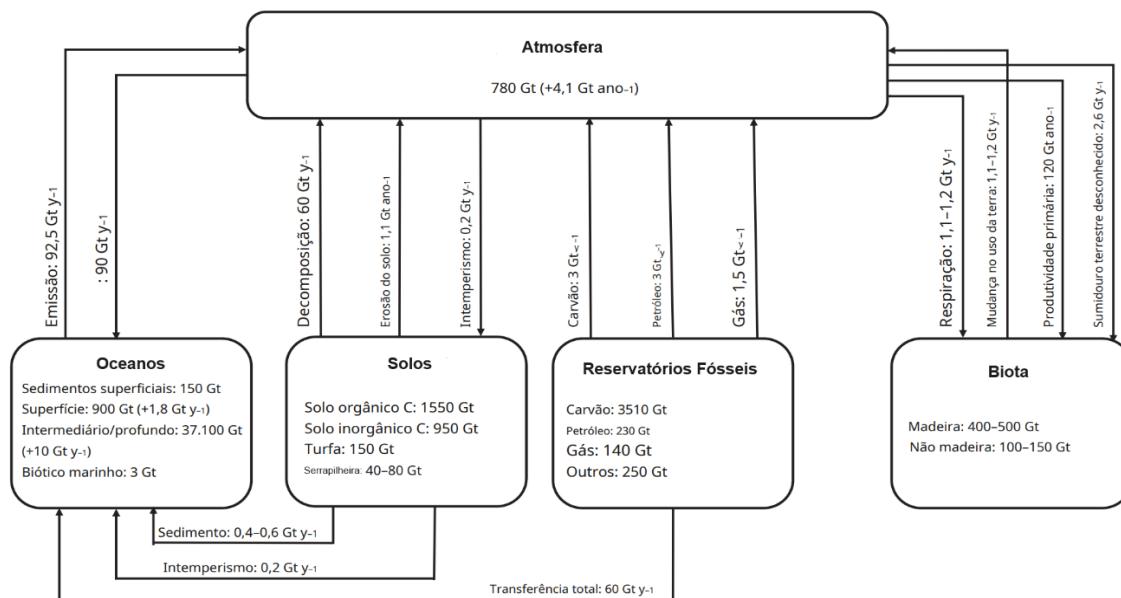
O carbono no solo (CS) está presente em formas orgânicas e inorgânicas. O carbono inorgânico do solo (CIS) é composto por carbonatos de cátions alcalinos (Bronick & Lal, 2005; Wang et al., 2013). Globalmente, os solos contêm aproximadamente 2.500 Gigatoneladas (Gt) de carbono, dos quais 1.550 Gt são de COS e 950 Gt de CIS até 1 metro de profundidade (Figura 5; Lal, 2008). Pequenas variações no teor de CS podem ter grandes impactos no ciclo global do carbono e no clima, dada a quantidade de carbono armazenada no solo, que é três vezes maior que na vegetação terrestre e na atmosfera (Schlesinger & Andrews, 2000). O COS é essencial para a saúde do solo e a sustentabilidade agrícola, sendo sua estabilização fundamental no sequestro de carbono e na mitigação das mudanças climáticas (Lehmann & Kleber, 2015; Six et al., 2002). A interação entre minerais de baixa cristalinidade, como os amorfos e os óxidos de ferro e alumínio, facilita a estabilização da matéria orgânica do solo (MOS) por meio da adsorção de compostos orgânicos, especialmente em solos tropicais, onde esses minerais são predominantes. Essas associações organominerais aumentam a retenção de carbono no solo, diminuindo sua mineralização e prolongando seu tempo de residência, sendo fundamentais para mitigar as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade dos ecossistemas (Carvalho et al., 2023). Além disso, há uma relação direta entre o manejo da matéria orgânica do solo e o ciclo global do carbono, o que impacta a dinâmica do uso de REM. A alteração da mineralogia do solo promovida por esses insumos pode influenciar a formação e a estabilidade das associações organominerais, contribuindo para um balanço negativo na emissão de CO<sub>2</sub> e favorecendo a mitigação das mudanças climáticas (Buss et al., 2024; Kotegoda et al., 2023; Guo et al., 2023; Carvalho et al., 2023).

As interações entre a matéria orgânica e os minerais ocorrem apenas por meio de adsorção, que prendem fisicamente a matéria orgânica à superfície mineral, e oclusão, que encapsula a matéria orgânica em agregados ou microporos, protegendo-a da degradação microbiana e de processos abióticos (Kleber et al., 2015b). Além disso, a formação de complexidades organominerais contribui significativamente para o sequestro e a estabilização do carbono no solo, influenciando o ciclo global do carbono e a fertilidade do solo (Kleber et al., 2021). Os minerais amorfos desempenham um papel essencial na retenção de carbono, pois possuem alta reatividade química e elevada área superficial, facilitando a adsorção de compostos orgânicos e sua mineralização. Além disso, esses minerais podem depender da disponibilidade de nutrientes ao interagir com cátions e ânions essenciais, formando complexos com fósforos, enxofre e metais micronutrientes, o que pode reduzir perdas por lixiviação e aumentar a eficiência do uso dos nutrientes pelas plantas (Chi et al., 2022). Minerais como filossilicatos, esmectitas e óxidos de ferro e alumínio também influenciam a estabilização do carbono orgânico do solo (COS), sendo que solos ricos em esmectitas apresentam maior

estabilização devido à sua alta superfície específica e capacidade de troca catiônica (CTC), favorecendo a retenção de matéria orgânica e nutrientes essenciais (Jobbág & Jackson, 2000; Wang et al., 2020).

A estabilização do COS, essencial para o sequestro de carbono e a mitigação das mudanças climáticas, pode ser física, química ou biológica. A proteção física envolve a segregação da matéria orgânica dentro de agregados do solo, dificultando a decomposição (Schmidt et al., 2011). A estabilização química ocorre por interações com minerais, como filossilicatos e óxidos de ferro e alumínio, enquanto a estabilização biológica resulta da decomposição incompleta da matéria orgânica por microrganismos, formando compostos orgânicos estáveis (Kleber et al., 2015a; Dungait et al., 2012).

Figura 5 – Principais reservatórios de C globais e fluxos entre eles



Fonte: adaptado de Lal, 2008.

A mineralogia da argila é um fator crucial na estabilização do carbono orgânico do solo (COS), com minerais como caulinita, illita e montmorilonita apresentando diferentes capacidades de proteção do carbono (Guo et al., 2024). Solos dominados por esmectita tendem a estabilizar melhor o COS do que solos dominados por caulinita, devido à maior CTC e ASE da esmectita (Cotrufo et al., 2015). Além disso, os minerais do solo afetam a labilidade do carbono, influenciando a facilidade com que ele pode ser decomposto e liberado como CO<sub>2</sub> (Lehmann & Kleber, 2015). Solos alofânicos e cloríticos, por exemplo, mostram menor labilidade do COS do que solos cauliniticos e esmectíticos, contrariando a ideia de que as esmectitas são mais eficazes na estabilização do carbono (Kleber et al., 2015a). A interação entre a matéria orgânica e os minerais do solo ocorre através de mecanismos como troca de ligantes, pontes catiônicas, atração eletrostática e forças de van der Waals (Wang et al., 2013), o que determina a estabilidade da matéria orgânica do solo (MOS) e sua resistência à decomposição (Dungait et al., 2012).

Além dos silicatos, minerais secundários, como óxidos de ferro e alumínio, desempenham um papel importante na estabilização do COS, formando complexos com a MOS que aumentam sua estabilidade (Torn et al., 1997). Estudando fontes de carbono orgânico dissolvido (DOC), Benke et al. (1999) demonstraram que a goethita possui alta afinidade por DOC, enquanto Bednik et al. (2023) mostraram a influência do biochar na dinâmica do carbono em solos franco-siltosos. Nguyen e Marschner (2014) observaram que a sorção de DOC foi menor em solos com maior teor de carbono orgânico total (COT) e menores concentrações de ferro e alumínio, ilustrando a complexidade das interações entre DOC e minerais do solo.

Estudos de adsorção e dessorção de DOC em diferentes solos revelam variações significativas conforme o tipo de mineral, incluindo óxidos de ferro, e a influência da perda de DOC devido ao efeito priming (Kuzyakov & Domanski, 2000). Experimentos de campo indicam que a adição de argila aumenta o carbono orgânico no solo por meio da incorporação de carbono em macroagregados, especialmente com o crescimento de plantas, sugerindo estratégias eficazes para o sequestro de carbono a curto prazo (Churchman et al., 2020).

A adoção de práticas agrícolas sustentáveis, como a rotação de culturas, o uso de culturas de cobertura e a aplicação de compostos orgânicos, pode melhorar a estabilização do COS. O intemperismo aprimorado das rochas e o uso de REM surgem como estratégias promissoras para aumentar a capacidade do solo de sequestrar carbono, com estudos futuros sendo necessários para entender melhor as interações entre remineralizadores e a estabilização do COS (Cotrufo et al., 2015). O impacto dos REM na mineralogia do solo e na liberação de nutrientes combinados a matéria orgânica e microrganismos solubilizadores de minerais é uma área de pesquisa em expansão, especialmente relevante para estratégias de mitigação das mudanças climáticas e uma opção sustentável em países em desenvolvimento (Basak et al., 2022).

#### 4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos sugerem que os remineralizadores de solo (REM) podem influenciar a capacidade de troca de cátions (CTC) e contribuir para a estabilização do carbono orgânico do solo (COS). A interação entre minerais derivados dos remineralizadores, matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio tem sido apontada como um fator relevante na retenção de cargas e na modificação das propriedades físico-químicas do solo (Santos et al., 2021). Assim, a adição desses insumos pode favorecer a formação de novas fases minerais com elevada carga superficial, aumentando o potencial do solo em armazenar nutrientes e estabilizar o carbono. No entanto, a magnitude desses efeitos pode variar de acordo com a composição mineralógica dos REM, a granulometria e as condições de manejo, indicando a necessidade de estudos adicionais para quantificar essas interações em diferentes sistemas agrícolas.

Além disso, a influência dos REM na estabilização do COS deve ser considerada no contexto das dinâmicas de intemperismo e biointemperismo. Como demonstrado em estudos anteriores, a liberação gradual de nutrientes e a interação entre minerais frescos e a biota do solo podem estimular processos que aumentam a retenção de carbono e melhoram a estrutura do solo (Swoboda et al., 2022). No entanto, ainda são necessários mais experimentos de longo prazo para avaliar como essas interações se desenvolvem sob diferentes condições

edafoclimáticas e de uso da terra. Dessa forma, este estudo contribui para ampliar a compreensão dos mecanismos pelos quais os REM podem atuar como agentes promotores da fertilidade e da estabilidade do carbono no solo, reforçando a importância de abordagens integradas para um manejo mais sustentável da fertilidade dos solos tropicais.

No entanto, é importante ressaltar que, apesar dos benefícios, ainda são necessários mais estudos de campo para avaliar os efeitos de longo prazo e a viabilidade econômica do uso dos REM em diferentes condições edafoclimáticas. À medida que novas pesquisas avançam, espera-se que o uso de REM se consolide como uma prática essencial para a agricultura sustentável, contribuindo para uma maior resiliência dos sistemas agrícolas e para a preservação dos recursos naturais, especialmente em regiões tropicais.

A literatura analisada forneceu informações sobre o papel dos REM na estabilidade da matéria orgânica e sua contribuição para uma agricultura mais sustentável, com menor dependência de insumos externos e maior eficiência na preservação dos ecossistemas e na manutenção dos ciclos biogeoquímicos (Buss et al., 2024; Glorieux & Delmelle, 2022).

## 5. REFERÊNCIAS

- ALLEONI, L. R. F.; MELLO, J. W. V.; ROCHA, W. S. D. **Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo.** In: ALLEONI, L. R. F.; MELO, V. F. (Eds.). Química e Mineralogia do Solo – parte II. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 69-130.
- AL RAWASHDEH, Rami. World peak potash: An analytical study. **Resources Policy**, v. 69, p. 101834, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101834>
- ANDERSON, S. J.; SPOSITO, G. Cesium adsorption methods for measuring accessible structural surface charge. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, p. 1569-1576, 1991. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500060011x>.
- ANDA. **Principais indicadores do Setor de Fertilizantes.** Disponível em: [https://anda.org.br/pesquisa\\_setorial/](https://anda.org.br/pesquisa_setorial/). Acesso em: 09 jun. 2024.
- ACKER, James G.; BRICKER, Owen P. The influence of pH on biotite dissolution and alteration kinetics at low temperature. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 56, n. 8, p. 3073-3092, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90290-Y](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90290-Y)
- BAKKEN, A. K.; GAUTNEB, H.; SVEISTRUP, T.; MYHR, K. Crushed rocks and mine tailings applied as K fertilizers on grassland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 56, p. 53-57, 2000.
- BARSHAD, I. Vermiculite and its relation to biotite as revealed by base exchange reactions, x-ray analyses, differential thermal curves, and water content. **American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials**, v. 33, n. 11-12, p. 655-678, 1948.
- BASAK, B. B. et al. Potassium supply in agriculture through biological potassium fertilizer: A promising and sustainable option for developing countries. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 68, n. 1, p. 101-114, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1821191>
- BEDNIK, M.; MEDYŃSKA-JURASZEK, A.; ĆWIELĄG-PIASECKA, I.; DUDEK, M. Enzyme activity and dissolved organic carbon content in soils amended with different types of biochar and exogenous organic matter. **Sustainability**, v. 15, n. 21, p. 15396, 2023. DOI: [doi.org/10.3390/su152115396](https://doi.org/10.3390/su152115396).
- BENKE, M. B.; MERMUT, A. R.; SHARIATMADARI, H. Retention of dissolved organic carbon from vinasse by a tropical soil, kaolinite, and Fe-oxides. **Geoderma**, v. 91, n. 1-2, p. 47-63, 1999.

BHATTACHARYYA, Siddhartha Shankar; FURTAK, Karolina. Soil–Plant–Microbe interactions determine soil biological fertility by altering rhizospheric nutrient cycling and biocrust formation. **Sustainability**, v. 15, n. 1, p. 625, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010625>

BOLLAN, N. S.; NAIDU, R.; SYERS, J. K.; TILLMAN, R. Surface charge and solute interaction in soils. In: **Advances in Agronomy**, v. 67, p. 87-140, 1999. doi: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60514-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60514-3).

BORTOLUZZI, E. C.; TESSIER, D.; RHEINHEIMER, D. S.; JULIEN, J. L. The cation exchange capacity of a sandy soil in southern Brazil: An estimation of permanent and pH-dependent charges. **European Journal of Soil Science**, v. 57, n. 3, p. 356-364, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00746.x>.

BOTTONI, I. J.; NORMANHA, B. A.; SUGAHARA, C. R.; FERREIRA, D. H. L.; SILVA, M. P. Mudanças climáticas e plano de ação de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> no município de Campinas/SP. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S. l.], v. 21, n. 1, 2025. DOI: [10.17271/1980082721120255597](https://doi.org/10.17271/1980082721120255597).

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, p. 3–22, 2005. DOI: [doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005).

BUSS, W.; HASSEMER, H.; FERGUSON, S.; BOREVITZ, J. Stabilisation of soil organic matter with rock dust partially counteracted by plants. **Global Change Biology**, v. 30, n. 1, e17052, 2024. doi: <https://doi.org/10.1111/gcb.17052>.

BUSATO, J. G.; LEÃO, T. P.; BALDOTTO, M. A.; CANELLAS, L. P. Organic matter quality and dynamics in tropical soils amended with sugar industry residue. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1179-1188, 2012. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000400012>.

CARVALHO, Martha Lustosa et al. Stabilization of organic matter in soils: drivers, mechanisms, and analytical tools—a literature review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, p. e0230130, 2023. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220130>

CHI, J.; FAN, Y.; WANG, L.; PUTNIS, C. V.; ZHANG, W. Retention of soil organic matter by occlusion within soil minerals. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 21, n. 3, p. 727-746, 2022. DOI: [doi.org/10.1007/s11157-022-09628-x](https://doi.org/10.1007/s11157-022-09628-x).

CHURCHMAN, G. J.; LOWE, D. J. **Alteration, formation, and occurrence of minerals in soils**. In: HUANG, P. M.; LI, Y.; SUMNER, M. E. (Eds.). **Handbook of Soil Sciences**, v. 1. Boca Raton: CRC Press, 2012. p. 20.1-20.72. doi: <https://doi.org/10.1201/b11267>.

CHURCHMAN, G. J.; SINGH, M.; SCHAPEL, A.; SARKAR, B.; BOLAN, N. Clay minerals as the key to the sequestration of carbon in soils. **Clays and Clay Minerals**, v. 68, n. 2, p. 135-143, 2020. DOI: [doi.org/10.1007/s42860-020-00071-z](https://doi.org/10.1007/s42860-020-00071-z).

CICERI, D.; MANNING, D. A. C.; ALLANORE, A. Historical and technical developments of potassium resources. **Science of Total Environment**, v. 502, p. 590-601, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.013>.

COTRUFO, M. F.; RANALLI, M. G.; HADDIX, M. L.; SIX, J.; LUGATO, E. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 12, p. 968-971, 2015. DOI: [doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6](https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6).

CRUSCIOL, Carlos Alexandre Costa et al. Broadcast application of ground silicate rocks as potassium sources for grain crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, p. e02443, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02443>.

CUNHA, J. C.; RUIZ, H. A.; FREIRE, M. B. G.; ALVAREZ, V. H.; FERNANDEZ, R. B. Quantification of permanent and variable charges in reference soils of the state of Pernambuco, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1162-1169, 2014. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400012>.

DERPSCH, Rolf et al. Nature's laws of declining soil productivity and Conservation Agriculture. **Soil Security**, v. 14, p. 100127, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilsec.2024.100127>.

DUARTE, W. M.; MAFRA, A. L.; FORESTI, M. M.; PICCOLA, C. D.; ALMEIDA, J. A. Potencial de olivina melilitito, granito e sienito nefelínico na disponibilização de potássio em solos. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 12, p. 68-77, 2013.

DUNGAIT, J. A. J.; HOPKINS, D. W.; GREGORY, A. S.; WHITMORE, A. P. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. **Global Change Biology**, v. 18, n. 6, p. 1781-1796, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x>.

ESSINGTON, M. E. **Soil and water chemistry: an integrative approach**. Boca Raton: CRC Press, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1201/b12397>.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, v. 58, p. 627-646, 2001. doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000300029>.

GLORIEUX, J.; DELMELLE, P. **Assessing the potential of enhanced silicate weathering in a tropical soil to remove atmospheric CO<sub>2</sub> and improve soil fertility: a modeling study**. Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain, 2022. Prom. : Delmelle, Pierre. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:38227>

GRANT, K. E.; GALY, V. V.; HAGHIPOUR, N.; EGLINTON, T. I.; DERRY, L. A. Persistence of old soil carbon under changing climate: The role of mineral-organic matter interactions. **Chemical Geology**, v. 587, 120629, 2022. DOI: [doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120629](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120629).

GUO, L.; QU, C.; ZHOU, Y.; CHEN, Y.; CAI, P.; CHEN, W.; ...; HUANG, Q. Trade-off between Pore-Throat Structure and Mineral Composition in Modulating the Stability of Soil Organic Carbon (2024). **Environmental Science & Technology**. DOI: [doi.org/10.1021/acs.est.3c09886?urlappend=%3Fref%3DPDF&jav=VoR&rel=cite-as](https://doi.org/10.1021/acs.est.3c09886?urlappend=%3Fref%3DPDF&jav=VoR&rel=cite-as).

GUO, F.; SUN, H.; YANG, J.; ZHANG, L.; MU, Y.; WANG, Y.; WU, F. Improving food security and farmland carbon sequestration in China through enhanced rock weathering: Field evidence and potential assessment in different humid regions. **Science of The Total Environment**, v. 903, 166118, 2023. DOI: [doi://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166118](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166118).

HEFFER, P.; PRUD'HOMME, M. Fertilizer Outlook 2013-2017. **International Fertilizer Industry Association (IFA), 2013**. Disponível em: <http://www.fertilizer.org>. Acessado em: 03 abr. 2015.

HINSINGER, P.; BOLLAND, M. D. A.; GILKES, R. J. Silicate rock powder: effect on selected chemical properties of a range of soil from Western Australia and on plant growth as assessed in a glasshouse experiment. **Fertilizer Research**, v. 45, p. 69-79, 2001.

HOLGERSSON, Stellan et al. Biotite dissolution kinetics at pH 4 and 6.5 under anaerobic conditions and the release of dissolved Fe (II). **Chemical Geology**, v. 662, p. 122204, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122204>

JILLING, A.; SOKOL, N. W.; MORÁN-RIVERA, K.; GRANDY, A. S. Wet-dry cycling influences the formation of mineral-associated organic matter and its sensitivity to simulated root exudates. **Geoderma**, v. 445, 116869, 2024. DOI: [doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116869](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116869).

JOBBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. **Ecological Applications**, v. 10, n. 2, p. 423-436, 2000. DOI: [doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423]2.0.CO;2).

KLEBER, M.; BOURG, I. C.; COWARD, E. K.; HANSEL, C. M.; MYNENI, S. C.; NUNAN, N. Dynamic interactions at the mineral-organic matter interface. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 2, n. 6, p. 402-421, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00162-y>.

KLEBER, M.; EUSTERHUES, K.; KEILUWEIT, M.; MIKUTTA, C.; MIKUTTA, R.; NICO, P. S. Mineral-organic associations: formation, properties, and relevance in soil environments. **Advances in Agronomy**, v. 130, p. 1-140, 2015. DOI: [doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.005](https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.005). a)

KLEBER, M.; SOLLINS, P.; SUTTON, R. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: Self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. **Biogeochemistry**, v. 85, p. 9-24, 2015. DOI: 10.1007/s10533-007-9103-5. b)

KÖNIG, Uwe; PÖLLMANN, Herbert; ANGÉLICA, Rômulo Simões. O Refinamento de Rietveld como um método para o controle de qualidade de minérios de ferro. Rem: **Revista Escola de Minas**, v. 55, n. 2, p. 111-114, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672002000200007>

KOTTEGODA, Nilwala et al. Climate smart agriculture: The role of fertilizer innovations and efficient plant nutrient management. **Vidyodaya Journal of Science**, v. 1, n. s1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.31357/vjs.v1is1.6709>

KRAHL, L. L.; MARCHI, G.; PAZ, S. P. A.; ANGÉLICA, R. S.; SOUSA-SILVA, J. C.; VALADARES, L. F.; MARTINS, É. D. 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. <https://doi.org/10.1590/1983-40632022v5272376>.

KUZYAKOV, Y.; DOMANSKI, G. Carbon input by plants into the soil. **Review. J Plant Nutr Soil Sci.**, v. 163, p. 421-431, 2000. DOI: [doi.org/10.1002/1522-2624\(200008\)163:4%3C421::AID-JPLN421%3E3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200008)163:4%3C421::AID-JPLN421%3E3.0.CO;2-R).

LAL, R. Carbon sequestration. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, p. 815–830, 2008. DOI: [doi.org/10.1098/rstb.2007.2185](https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185).

LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, v. 528, n. 7580, p. 60-68, 2015. DOI: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nature16069>.

LOPES, K. S. M., YOKOBATAKE, K. L. A., & PINHEIRO, R. S. B. Sistemas de produção de bovinos e a emissão de metano. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental de Alta Paulista**, v. 9, p. 153-158, 2013.

LUCHESE, A. V.; DE CASTRO LEITE, I. J. G.; ALVES, M. L.; DOS SANTOS VIECELI, J. P.; PIVETTA, L. A.; MISSIO, R. F. Can Basalt Rock Powder be Used as an Alternative Nutrient Source for Soybeans and Corn?. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 3, p. 4044-4054, 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01322-3>.

MANNING, D. A.; 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. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.11.002>.

MARTINS, E.; HARDOIM, P. R.; MARTINS, É. S. **Efeito da aplicação dos remineralizadores no solo**. Informe Agropecuário, v. 44, n. 321, p. 49-56, 2023.

MARTINS, Eder de Souza et al. **Produção brasileira de remineralizadores e fertilizantes naturais: 2019 a 2023**. 2024.

MEDEIROS, F. D. P.; CARVALHO, A. M. D.; GINDRI RAMOS, C.; DOTTO, G. L.; CARDOSO, I. M.; THEODORO, S. H. Rock Powder Enhances Soil Nutrition and Coffee Quality in Agroforestry Systems. **Sustainability**, v. 16, n. 1, p. 354, 2023. <https://doi.org/10.3390/su16010354>.

MIKUTTA R., MIKUTTA C., KALBITZ K., SCHEEL T., KAISER K.; JAHN R. (Biodegradation of forest floor organic matter bound to minerals via different binding mechanisms. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 71, n. 10, p. 2569-2590, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.03.002>

NEWCOMB, C. J., QAFOKU, N. P., GRATE, J. W., BAILEY, V. L., & DE YOREO, J. J. Developing a molecular picture of soil organic matter–mineral interactions by quantifying organo–mineral binding. **Nature communications**, v. 8, n. 1, p. 396, 2017. DOI: [10.1038/s41467-017-00407-9](https://doi.org/10.1038/s41467-017-00407-9)

NGUYEN, T.-T.; MARSCHNER, P. Retention and loss of water extractable carbon in soils: effect of clay properties. **Science of the Total Environment**, v. 470–471, p. 400–406, 2014. DOI: [doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.002](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.002).

PARKS, G. A.; BRUYN, P. L. The zero point of charge of oxides. **Journal of Physical Science**, v. 66, p. 967-973, 1962.

PEREIRA, L. F.; RIBEIRO JUNIOR, W. Q.; RAMOS, M. L. G.; SANTOS, N. Z. D.; SOARES, G. F.; CASARI, R. A. D. C. N.; SOUSA, C. A. F. D. Physiological changes in soybean cultivated with soil remineralizer in the Cerrado under variable

water regimes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 56, e01455, 2021. doi: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.01455>.

RAMOS, C. G.; HOWER, J. C.; BLANCO, E.; OLIVEIRA, M. L. S.; THEODORO, S. H. Possibilities of using silicate rock powder: An overview. **Geoscience Frontiers**, v. 13, n. 1, p. 101185, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185>.

REATTO, A.; MARTINS, E. S. **Classes de solo em relação aos controles de paisagem do Bioma Cerrado**. In: SCARIOT, A.; SILVA, J. C. S.; FELFILLI, J. M. (Eds.), *Cerrado: Ecologia, Biodiversidade e Conservação*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, p. 47-59, 2005.

SANTOS, H.G dos ; JACOMINE, P.K.T ; ANJOS, L.H.C dos ; OLIVEIRA, V.A de ; LUMBRERAS, J.F. ; COELHO, M.R. ; ALMEIDA, J.A. de ; ARAÚJO FILHO, J.C. de ; OLIVEIRA, J.B. de ; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**.- 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2018.

SANTOS, L. F. D.; SODRÉ, F. F.; MARTINS, É. D. S.; FIGUEIREDO, C. C. D.; BUSATO, J. G. Effects of biotite syenite on the nutrient levels and electrical charges in a Brazilian Savanna Ferralsol. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 51, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632021v5166691>.

SCHNEIDER, M. P. W., SCHEEL, T., MIKUTTA, R., VAN HEES, P., KAISER, K., & KALBITZ, K. Sorptive stabilization of organic matter by amorphous Al hydroxide. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 74, n. 5, p. 1606-1619, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.12.017>

SCHLESINGER, W. H.; ANDREWS, J. A. Soil respiration and the global carbon cycle. **Biogeochemistry**, v. 48, p. 7–20, 2000.

SCHMIDT, M. W. I.; TORN, M. S.; ABIVEN, S.; DITTMAR, T.; GUGGENBERGER, G.; JANSSENS, I. A.; KLEBER, M.; KÖGEL-KNABNER, I.; LEHMANN, J.; MANNING, D. A. C.; NANNIPIERI, P.; RASSE, D. P.; WEINER, S.; TRUMBORE, S. E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**, v. 478, n. 7367, p. 49-56, 2011. DOI: [doi:10.1038/nature10386](https://doi.org/10.1038/nature10386).

SINGH, M.; SARKAR, B.; BISWAS, B.; CHURCHMAN, J.; BOLAN, N. S. Adsorption-desorption behavior of dissolved organic carbon by soil clay fractions of varying mineralogy. **Geoderma**, v. 280, p. 47-56, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.005>.

SINGH, M.; SARKAR, B.; SARKAR, S.; CHURCHMAN, J.; BOLAN, N.; MANDAL, S. Stabilization of soil organic carbon as influenced by clay mineralogy. **Advances in Agronomy**, v. 148, p. 33-84, 2018. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.001>.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p. 155–176, 2002.

SOUZA JUNIOR, I. G. D.; COSTA, A. C. S. D.; SAMBATTI, J. A.; PETERNELE, W. S.; TORMENA, C. A.; MONTES, C. R.; CLEMENTE, C. A. Contribuição dos constituintes da fração argila de solos subtropicais à área superficial específica e à capacidade de troca cationica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1355-1365, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600014>.

SOUZA, M. E. P.; CARVALHO, A. M. X.; DELIBERALI, D. C.; JUCKSH, I.; BROWN, G. G.; MENDONÇA, E. S.; CARDOSO, I. M. Vermicomposting with rock powder increases plant growth. **Applied Soil Ecology**, v. 69, p. 56–60, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.01.016>.

SPOHN, M., DIÁKOVÁ, K., ABURTO, F., DOETTERL, S., & BOROVEC, J. Sorption and desorption of organic matter in soils as affected by phosphate. **Geoderma**, v. 405, p. 115377, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115377>

SPOSITO, G. **The surface chemistry of soils**. Oxford University Press, 1984.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. Oxford University Press, Oxford, 277 p., 2. ed., 2008.

SWOBODA, Philipp; DÖRING, Thomas F.; HAMER, Martin. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. *Science of The Total Environment*, v. 807, p. 150976, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150976

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Artmed, Porto Alegre, 5ed. 2013 721p.

TAN, K. H.; BINGER, A. Effect of Humic Acid on Aluminum toxicity in corn plants. *Soil Science*, v. 141, p. 54-67, 1985.

THENG, B. K. **Clay mineral catalysis of organic reactions**. CRC Press, 2018.

TONG, Y.; XIANG, H.; JIANG, J.; CHEN, W. Interfacial interactions between minerals and organic matter: Mechanisms and characterizations. *Chemosphere*, 142383, 2024. DOI: doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142383.

TORN, M. S.; TRUMBORE, S. E.; CHADWICK, O. A.; VITOUSEK, P. M.; HENDRICKS, D. M. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature*, v. 389, p. 170-173, 1997.

UEHARA, G.; GILLMAN, G. P. Charge Characteristics of Soils with Variable and Permanent Charge Minerals: II. Experimental. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, n. 4, 1980.

UROZ S, CALVARUSO C, TURPAULT MP, FREY-KLETT P. Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms. *Trends in microbiology*, v. 17, n. 8, p. 378-387, 2009.

VINOD, P. N.; CHANDRAMOULI, P.; KOCH, M. Estimation of nitrate leaching in Groundwater in agriculturally used area in the State Karnataka, India, Using existing Model and GIS. *Aquatic Procedia*, v. 4, p. 1047-1053, 2015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.132>.

VOLF, M. R.; BENITES, V. M.; AZEVEDO, A. C.; MORAES, M. F.; TIRITAN, C. S.; ROSOLEM, C. A. Soil mineralogy and K reserves in soils from the Araguaia River valley, Brazil. *Geoderma Regional*, v. 33, e00654, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00654>.

WANG, G.; POST, W. M.; MAYES, M. A.; FRERICHS, J. T.; SINDHU, J. Parameter uncertainty of the CENTURY model and its impact on the estimation of soil organic carbon dynamics. *Environmental Modelling & Software*, v. 47, p. 128-139, 2013. DOI: doi.org/10.1371/journal.pone.0082029.

WANG, Y.-H.; SHI, Y.-M.; SUN, G.-D.; LI, J.-T.; CHEN, H.; CHOW, A. T.; YANG, Z.-B.; MAJIDZADEH, H.; WANG, J.-J. Soil organic carbon signature under impervious surfaces. *ACS Earth Space Chem.*, v. 4, p. 1785-1792, 2020. DOI: doi.org/10.1021/acsearthspacechem.0c00174.

WEBER, O. L. S.; CHITOLINA, J. C.; CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. Cargas elétricas estruturais e variáveis de Solos tropicais altamente intemperizados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p. 867-873, 2005. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000600004>.

WILCKE, W.; LILLENFEIN, J. Nutrient Leaching in Oxisols Under Native and Managed Vegetation in Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, v. 69, p. 1152-1161, 2005. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0350>.

ZINN, Yuri L.; LAL, Rattan; RESCK, Dimas VS. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 84, n. 1, p. 28-40, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.007>

---

## DECLARAÇÕES

---

### CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

Ao descrever a participação de cada autor no manuscrito, utilize os seguintes critérios:

- **Concepção e Design do Estudo:** Luiz Fernando dos Santos e Éder de Souza Martins
- **Curadoria de Dados:** Ewerton Gonçalves de Abrantes e Giuliano Marchi
- **Análise Formal:** Luiz Fernando dos Santos

- **Aquisição de Financiamento:** Éder de Souza Martins e Giuliano Marchi
  - **Investigação:** Luiz Fernando dos Santos
  - **Metodologia:** Luiz Fernando dos Santos
  - **Redação - Rascunho Inicial:** Luiz Fernando dos Santos
  - **Redação - Revisão Crítica:** Éder de Souza Martins; Ewerton Gonçalves de Abrantes e Giuliano Marchi
  - **Revisão e Edição Final:** Luiz Fernando dos Santos e Éder de Souza Martins
  - **Supervisão:** Éder de Souza Martins
- 

**DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE**

Nós, Luiz Fernando dos Santos, Ewerton Gonçalves de Abrantes, Giuliano Marchi e Éder de Souza Martins declaramos que o manuscrito intitulado “Artigo de Revisão: Inovações na Fertilização do Solo e o Papel dos Remineralizadores.”

1. **Vínculos Financeiros:** Não possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho. Nenhuma instituição ou entidade financiadora esteve envolvida no desenvolvimento deste estudo
  2. **Relações Profissionais:** Não possui/possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados. Nenhuma relação profissional relevante ao conteúdo deste manuscrito foi estabelecida.
  3. **Conflitos Pessoais:** Não possui/possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito. (Detalhe aqui, se aplicável: "Eu/Nós tenho/temos relação pessoal com [nome da pessoa. Nenhum conflito pessoal relacionado ao conteúdo foi identificado.
-