



Artigo de Revisão: Inovações na Fertilização do Solo e o Papel dos Remineralizadores

Scientific Review: Innovations in Soil Fertilization and the Role of Remineralizers

Revisión Científica: Innovaciones en la Fertilización del Suelo y el Papel de los Remineralizadores

Luiz Fernando dos Santos

Doutorando em Ciências Ambientais, UnB, Brasil
nandosantos.fsa@gmail.com

Ewerton Gonçalves de Abrantes

Doutor, Embrapa Cerrados
ewertonagroti@hotmail.com

Giuliano Marchi

Doutor, Embrapa Cerrados
giuliano.marchi@embrapa.br

Éder de Souza Martins

Doutor, Embrapa Cerrados
eder.martins@embrapa.br

RESUMO

O artigo realiza uma revisão abrangente sobre o papel dos remineralizadores de solo (REM) na agricultura, examinando seu impacto na fertilidade dos solos tropicais, com especial enfoque na capacidade de troca catiônica (CTC) e na estabilização do carbono orgânico. O estudo também explora o potencial dos REM na mitigação das emissões de gases de efeito estufa, promovendo uma agricultura mais sustentável. Na metodologia, foi conduzida uma revisão de literatura abrangente nas bases Web of Science e Google Acadêmico, selecionando estudos que analisam a interação entre minerais do solo, CTC e a influência dos REM na fertilidade e sequestro de carbono. Os REM emergem como uma alternativa sustentável e complementar aos fertilizantes sintéticos, preenchendo uma lacuna teórica sobre o uso desses materiais em solos tropicais intemperizados. Os principais achados indicam que os REM aumentam a CTC, melhoram a disponibilidade de nutrientes, como fósforo e potássio, e contribuem para a estabilização do carbono no solo. Além disso, o estudo aprofunda a compreensão sobre o biointemperismo e a dinâmica dos nutrientes. O uso de REM tem o potencial de reduzir a dependência de fertilizantes químicos, fomentar práticas agrícolas sustentáveis e mitigar os efeitos das mudanças climáticas.

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

ABSTRACT

The article provides a comprehensive review of the role of soil remineralizers (SR) in agriculture, examining their impact on the fertility of tropical soils, with particular focus on cation exchange capacity (CEC) and organic carbon stabilization. The study also explores the potential of SR in mitigating greenhouse gas emissions, promoting more sustainable agriculture. The methodology involved an extensive literature review using the Web of Science and Google Scholar databases, selecting studies that analyze the interaction between soil minerals, CEC, and the influence of SR on fertility and carbon sequestration. SR emerge as a sustainable and complementary alternative to synthetic fertilizers, filling a theoretical gap regarding the use of these materials in highly weathered tropical soils. The main findings indicate that SR enhance CEC, improve the availability of nutrients such as phosphorus and potassium, and contribute to the stabilization of soil carbon. Furthermore, the study deepens the understanding of bioweathering and nutrient dynamics. The use of SR has the potential to reduce reliance on chemical fertilizers, foster sustainable agricultural practices, and mitigate the effects of climate change.

KEYWORDS: Agricultural sustainability. Soil management. Rock powder

RESUMEN

El artículo ofrece una revisión exhaustiva sobre el papel de los remineralizadores de suelo (RS) en la agricultura, analizando su impacto en la fertilidad de los suelos tropicales, con un enfoque particular en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la estabilización del carbono orgánico. El estudio también explora el potencial de los RS en la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero, promoviendo una agricultura más sostenible. La metodología incluyó una revisión exhaustiva de la literatura utilizando las bases de datos Web of Science y Google Académico, seleccionando estudios que analizan la interacción entre los minerales del suelo, la CIC y la influencia de los RS en la fertilidad y el secuestro de carbono. Los RS surgen como una alternativa sostenible y complementaria a los fertilizantes sintéticos, llenando un vacío teórico sobre el uso de estos materiales en suelos tropicales altamente meteorizados. Los principales hallazgos indican que los RS mejoran la CIC, aumentan la disponibilidad de nutrientes como el fósforo y el potasio, y contribuyen a la estabilización del carbono en el suelo. Además, el estudio profundiza en la comprensión de la meteorización biológica y la dinámica de los nutrientes. El uso de RS tiene el potencial de reducir la dependencia de fertilizantes químicos, fomentar prácticas agrícolas sostenibles y mitigar los efectos del cambio climático.

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

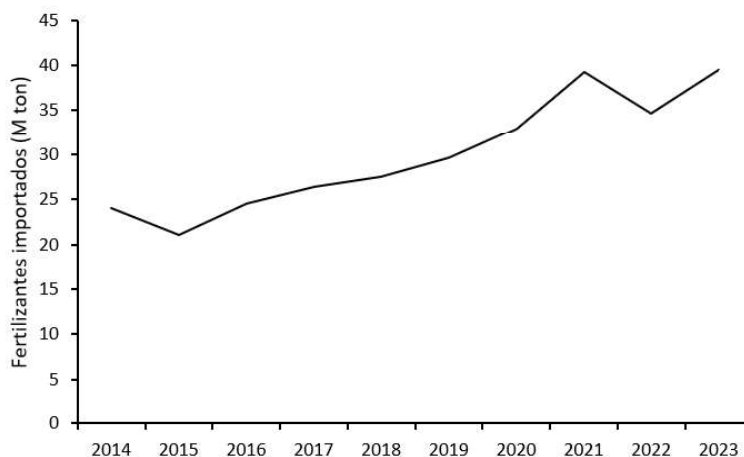
INTRODUÇÃO

Práticas agrícolas tradicionalistas e seus impactos ambientais e econômicos

A agricultura, uma das atividades humanas mais antigas, desempenhou 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 que reciclava nutrientes de maneira sustentável (Ciceri, 2015). Contudo, a Revolução Industrial trouxe uma transformação profunda, com a introdução de fertilizantes sintéticos, impulsionada pela síntese de amônia pelo do processo Haber-Bosch, aumentando significativamente a produtividade agrícola (Heffer & Prudd'homme, 2013).

Apesar do aumento da produtividade, o uso de fertilizantes sintéticos trouxe uma série de impactos ambientais e econômicos negativos, incluindo a contaminação de lençóis freáticos, emissões de gases de efeito estufa e a dependência de insumos importados. No Brasil, por exemplo, em 2023, 85% dos fertilizantes utilizados foram importados, totalizando quase 40 milhões de toneladas de fertilizantes importados no ano de 2023 (Figura 1) (ANDA, 2024). Adicionalmente, o manejo inadequado do solo e o uso excessivo de fertilizantes solúveis contribuíram para a perda de matéria orgânica e o aumento das emissões de CO₂. Diante desse cenário, os remineralizadores de solo (REM) surgem como uma alternativa promissora, com potencial para mitigar esses impactos negativos e promover a sustentabilidade agrícola (Buss et al., 2023; Glorieux & Delmelle, 2022).

Figura 1 - Evolução das importações de fertilizantes industriais (em Megatoneladas) no Brasil decênio 2014-2023 (ANDA, 2024)



OBJETIVOS

Este artigo tem como objetivo investigar, por meio de uma análise da literatura publicada, a importância do uso de remineralizadores de solo 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.

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 remineralizadores de solo 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; Krahel 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 remineralizadores na mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

MÉTODO DE ANÁLISE

A análise realizada sobre a influência dos remineralizadores na capacidade de troca catiônica (CTC) e nas cargas elétricas dos solos priorizou estudos que abordaram a interação entre minerais do solo e a CTC, além de investigar a eficácia dos remineralizadores. Foram utilizados critérios rigorosos, começando pela caracterização completa das rochas aplicadas, como por exemplo, por meio de difratometria de raios-X (DRX), fluorescência de raios-X (FRX) e granulometria. Além disso, a caracterização detalhada dos solos também foi considerada, englobando o tipo de solo e seus atributos químicos e físicos. A aplicabilidade dos remineralizadores foi discutida em relação à sua necessidade em diferentes tipos de solo e em diversos sistemas de cultivo. Adicionalmente, foram analisados os métodos empregados para medir a CTC, comparando os resultados não apenas com tratamentos controle, mas também com controles positivos e negativos. No caso das rochas potássicas, por exemplo, as comparações foram realizadas entre tratamentos com e sem adição de potássio, enquanto, no caso das rochas básicas, os tratamentos foram comparados com e sem a adição de calcário ou outros carbonatos.

Para a avaliação do carbono orgânico do solo (COS) e sua estabilização, foram analisados artigos que investigam 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. Os remineralizadores influenciam na capacidade de troca catiônica (CTC), mas também contribuem para a estabilização do carbono orgânico do solo (COS) ao promover interações entre minerais, matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio. Assim, a adição de remineralizadores melhora tanto a fertilidade quanto a capacidade do solo de

armazenar carbono, influenciando diretamente as dinâmicas de CTC e COS sob diferentes condições de manejo.

RESULTADOS

CTC e Cargas Elétricas

A capacidade de troca de cátions (CTC) é uma medida fundamental que indica a capacidade do solo de reter e trocar cátions, que são íons carregados positivamente e essenciais para a nutrição das plantas. Solos com alta CTC podem reter uma maior quantidade de nutrientes e, portanto, são mais férteis e mais capazes de sustentar o crescimento das plantas. A CTC é influenciada pela quantidade e tipos de argilas e matéria orgânica presentes no solo, bem como pelo pH do solo (Sposito, 2008).

As cargas no solo, que são cruciais para 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 nos minerais argilosos 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, 2008).

A formação de cargas elétricas nos solos 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 siloxanos gera cargas elétricas estruturais ou permanentes, conhecidas como σp (Bollan et al., 1999; Fontes et al., 2001; Sposito, 2008). Este processo confere às superfícies uma carga negativa predominante, 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 filossilicato são frequentemente envolvidos neste tipo de carga, conhecida como σH . À medida que o pH diminui, a protonação desses grupos aumenta, resultando em uma carga positiva que facilita a retenção de ligantes orgânicos através de rápida troca de ligantes.

Os mecanismos de adsorção organomineral, influenciados pela química da superfície do mineral, podem ser agrupados em três categorias principais: superfícies com carga variável, superfícies sem carga e superfícies com carga negativa. 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 caulim, resulta em superfícies eletrostaticamente neutras. Estas superfícies neutras permitem a acumulação de moléculas orgânicas não polares por meio de fenômenos de exclusão hidrofóbica, impulsionados pela entropia em combinação com forças de Lifshitz-van der Waals e formação de ligações de hidrogênio (Figura 2) (Kleber et al., 2021.).

A compreensão das propriedades dos minerais em rochas é crucial para investigar a dinâmica dos solos, com foco na carga superficial e na capacidade de troca catiônica (CTC), que afetam a reatividade e as interações minerais (Sposito, 1984; Sposito, 2008). A CTC varia em minerais primários como feldspatos, dependendo da composição e estrutura cristalina (Kleber et al., 2021). Minerais secundários, como argilas expansivas 2:1, apresentam maior CTC devido a cargas negativas permanentes de substituições isomórficas; a vermiculita, similar à montmorilonita, exemplifica isso (Theng, 2018). A caulinita, com estrutura 1:1 e baixa CTC, é menos representativa. Óxidos como a goethita e a gibbsita, com baixa CTC e carga superficial, têm interações limitadas com íons (Souza Junior et al., 2007; Pereira et al., 2021). Minerais amorfo, como os alofanos, apesar de alta área superficial, têm carga superficial reduzida e interações predominantemente por forças de Van der Waals (Kleber et al., 2021; Shing et al., 2016; Shing et al., 2018). A Figura 3 ilustra a estrutura dos minerais discutidos, e o Quadro 1 fornece detalhes específicos sobre suas propriedades. Argilominerais como illita, montmorilonita e vermiculita apresentam altos níveis de carga permanente superficial (σ_p), enquanto óxidos de ferro e alumínio, assim como a matéria orgânica, desenvolvem predominantemente carga de superfície variável (σ_H). A soma dessas cargas constitui a carga total de superfície (σ_T), descrita pela equação $\sigma_p + \sigma_H = \sigma_T$ (Uehara & Gilman, 1980). A adsorção de Cs^+ , usando soluções de CsCl e trocas iônicas, é uma técnica prática para medir essas cargas, embora seja pouco utilizada em solos brasileiros (Anderson & Sposito, 1991). Weber et al. (2005) encontraram cargas permanentes de $5,8 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ em um Latossolo Amarelo Ácrico, $11,7 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ em um Latossolo Vermelho Acriférico argiloso, e $10,4 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ em um Latossolo Vermelho Acriférico de textura média. Busato et al. (2012) relataram $5,0 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ em um Latossolo Amarelo Eutrófico típico, e Cunha et al. (2014) encontraram $65,6 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ em Argissolos Vermelho-Amarelo e $10,9 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ em um Latossolo Amarelo. A variação nas capacidades de carga dos solos indica uma tendência de maior proporção de cargas variáveis em solos tropicais intemperizados (Fontes et al., 2001). A aplicação de remineralizadores (REM), como o sienito, pode alterar essas propriedades, aumentando a CTC e reduzindo a perda de nutrientes, sugerindo melhorias significativas na fertilidade do solo em curto prazo.

Quadro 1 - Parâmetros de Capacidade de Troca Catiônica e Área Superficial Específica de Minerais de Argila

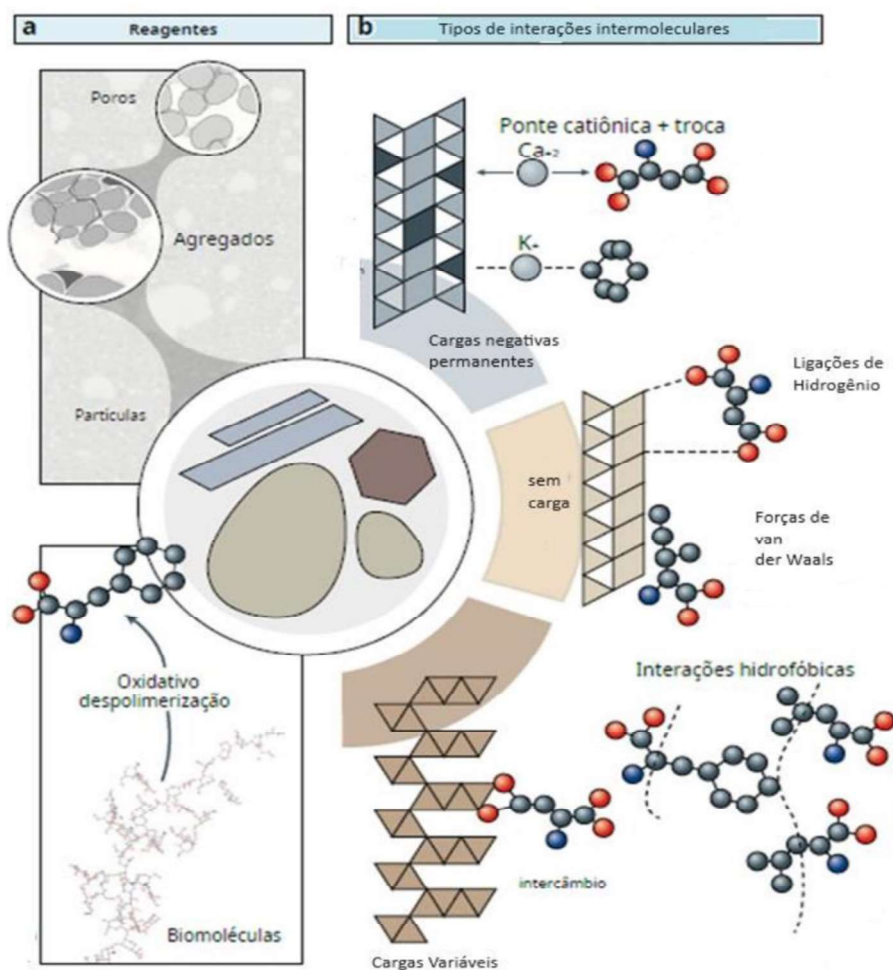
Minerais	Tipo	σ_p ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	σ_H ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	CTC ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	ASE ($\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$)
Caulinita	1:1	-	20 ⁽¹⁾	0 a 80 ⁽²⁾	7 a 80 ⁽¹⁾
Gibbsita	1:1	-	20 ⁽¹⁾	variável com pH ⁽²⁾	1 a 100 ⁽¹⁾
Goethita	1:1	-	0 a 150 ⁽¹⁾	variável com pH ⁽²⁾	40 a 90 ⁽¹⁾
Vermiculita	2:1	140 ⁽⁴⁾	180 a 220 ⁽⁴⁾	1200 a 1500 ⁽²⁾	600 a 800 ⁽²⁾
Montmorilonita	2:1	700 ⁽³⁾	110 ⁽³⁾	800 a 1200 ⁽²⁾	650 a 800 ⁽²⁾
Illita	2:1	105 ⁽³⁾	40 a 120 ⁽³⁾	100 a 400 ⁽²⁾	20 a 200 ⁽¹⁾
Alofana	amorfo	-	0 a 1000 ⁽¹⁾	variável com pH ⁽²⁾	700 a 900 ⁽¹⁾

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

Os Latossolos do Cerrado brasileiro, notoriamente caracterizados por baixa fertilidade natural, CTC limitada e alta acidez. Essas características são predominantemente consequência da sua mineralogia específica, que inclui uma alta concentração de óxidos de ferro e alumínio, como goethita e gibbsita, produtos do intenso intemperismo químico típico das condições climáticas tropicais (Fontes et al., 2001; Alleoni et al., 2009). Esses minerais contribuem para uma baixa CTC,

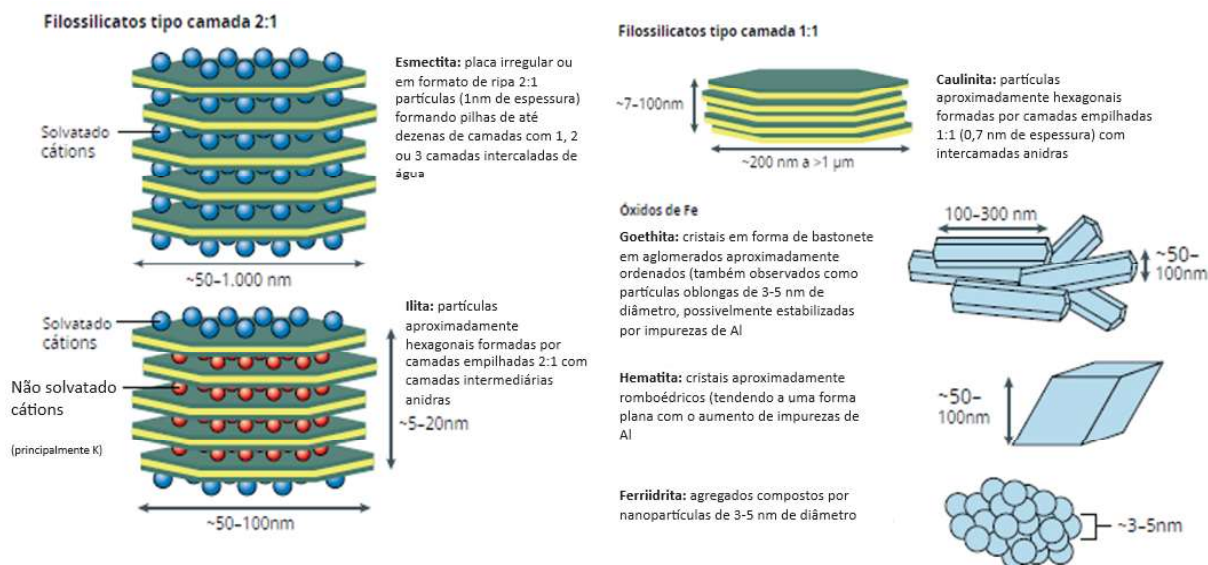
pois oferecem poucos sítios para retenção de cátions. Além disso, a rápida decomposição da matéria orgânica, acelerada pelas altas temperaturas e umidade do Cerrado, diminui sua contribuição à capacidade de troca catiônica (Sposito, 2008). Essa interação entre mineralogia e matéria orgânica foi aprofundada em estudos como o de Tan e Dowling (1984), que exploraram como diferentes tipos de argila reagem à remoção da matéria orgânica, afetando as cargas permanentes e variáveis da CTC.

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 anfífilos 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 geométrica de argilominerais encontrados nos solos



(Kleber et al., 2021.)

Investigações mais recentes, como as de Santos et al. (2021), têm explorado alternativas para aumentar a fertilidade desses solos. O estudo avaliou a aplicação de biotita-sienito finamente moído como uma fonte alternativa de nutrientes e cargas elétricas em um Latossolo do Cerrado. Os resultados mostraram que essa abordagem aumenta significativamente os níveis de fósforo e potássio disponíveis, além de incrementar as cargas permanentes, promovendo assim o desenvolvimento e nutrição do milho. Este achado sugere que o biotita-sienito pode ser uma alternativa viável para melhorar a produtividade agrícola em solos com características limitantes (Santos et al., 2021). Por outro lado, Cunha et al. (2014) ao quantificarem as cargas permanentes e variáveis em solos de referência de Pernambuco, destacaram a importância das cargas permanentes, e observaram que são intrínsecas à estrutura mineral e permanecem constantes independentemente das condições ambientais.

No entanto, é crucial entender a interação entre cargas permanentes e dependentes do pH, como discutido por Bortoluzzi et al. (2005). Eles investigaram a CTC de um solo arenoso no sul do Brasil, estimando as contribuições de cargas permanentes e dependentes do pH. Este estudo revelou que a capacidade do solo de reter nutrientes é significativamente influenciada pelo pH, teor de argila e matéria orgânica, o que é fundamental para a gestão eficiente dos Latossolos no Cerrado (Bortoluzzi et al., 2005). Por fim, a revisão das interações complexas entre mineralogia do solo, matéria orgânica e técnicas de manejo, como a calagem e a introdução de novos materiais, ressalta a necessidade de uma abordagem multifacetada para superar os desafios naturais dos Latossolos do Cerrado, visando práticas agrícolas sustentáveis e produtivas.

Remineralizadores e a relação com cargas e CTC

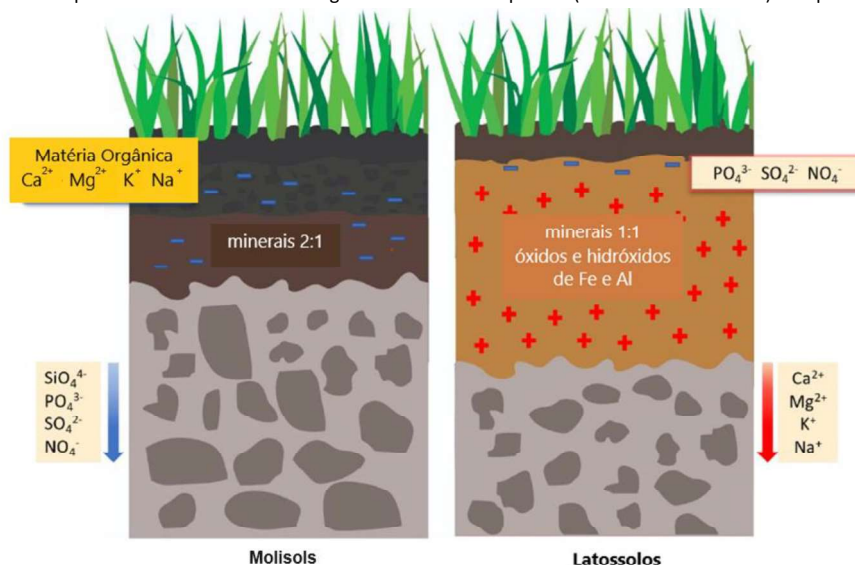
Os remineralizadores de solos (REM), definidos pela legislação brasileira (Lei nº 12.890, de 2013) como materiais de origem mineral moídos mecanicamente, oferecem uma alternativa promissora para melhorar a CTC dos solos. A aplicação desses materiais pode aumentar as cargas no solo e, assim, melhorar a retenção de nutrientes. Além disso, a literatura científica tem mostrado que o uso de REM pode resultar em melhorias significativas na fertilidade do solo, aumentando a disponibilidade de fósforo e potássio, elevando os níveis de matéria orgânica e melhorando a estrutura do solo, garantindo assim uma produção de alimentos com menor impacto ambiental (Hinsinger et al., 2001; Bakken et al., 2000; Manning & Theodoro, 2020; Ramos et al., 2022).

Por fim, a integração dos REM no manejo dos Latossolos é vista como um avanço significativo. Melhorando a CTC e ajustando o equilíbrio ácido-base, esses materiais contribuem para um ambiente de cultivo mais propício, reduzindo a dependência de químicos e promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis. 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. A continuação deste capítulo trará uma revisão mais aprofundada desses tópicos, fundamentando a discussão em estudos de caso e dados empíricos que ilustram as transformações na agricultura moderna (Souza et al., 2013; Duarte et al., 2013). Incluindo aqui o manejo da matéria orgânica do solo e a relação com o Ciclo Global de carbono, o que interfere diretamente a dinâmica da prática do uso de remineralizadores ter um balanço negativo na emissão de CO₂, favorecendo assim a mitigação das mudanças climáticas (Buss et al, 2024; Nimanka et al., 2023; Curtis et al., 2023; Guo et al. 2023).

Devemos destacar também o processo de biointemperismo que acontece nessas rochas, nesse processo, os minerais primários (originais da rocha) podem ser transformados por ação biológica em novos minerais (Krahl et al., 2022). Sendo esses minerais de fases de transição, hidratados, secundários e de estrutura amorfa possuem maior CTC e ASE comparados aos minerais primários (vide Tabela 1). Ou seja, para melhores resultados de fertilidade e de atributos químicos de um solo tratado com remineralizadores, a atividade biológica é extremamente essencial (Martins et al., 2022).

A mineralogia dos Latossolos, notadamente dos minerais de camada 1:1, desempenha um papel crucial na determinação de sua capacidade de troca de íons e fertilidade (Figura 4). Estudos destacam a influência direta da composição mineral na absorção de nutrientes, como o fósforo, sendo crucial compreender essa relação (Essington, 2003; Uehara e Gillman, 1980). Estratégias de manejo, como a aplicação de calcário e a preservação da matéria orgânica, são fundamentais para melhorar a fertilidade dos Latossolos e aumentar sua produtividade, conforme indicado por Reatto e Martins (2005) e Wilcke e Lilienfein (2005). Além disso, a utilização de REM pode desempenhar um papel importante na revitalização desses solos, fornecendo minerais essenciais que podem ser escassos em solos tropicais (Manning & Theodoro, 2020).

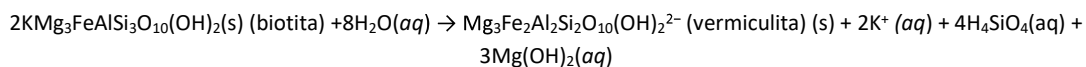
Figura 4 - Principais características dos solos agrícolas de clima temperado (Molisols- Chernossolo) e tropical (Latosolos).



Fonte: Krahel et al., 2022.

Santos et al. (2021) investigaram 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 79% do total, enquanto as cargas permanentes eram de 21%. Esses valores são semelhantes aos encontrados por Busato et al. (2012) e Weber et al. (2005) em estudos sobre Latossolos. A adição de remineralizador aumentou significativamente as cargas permanentes nas maiores dosagens, mantendo-se elevadas após o primeiro ciclo de cultivo de milho, sem alterar as cargas variáveis. 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 aumente os teores de $\text{Fe}^{2+/3+}$ e Al^{3+} no solo, a presença de argilominerais 2:1 e 1:1 pode elevar as cargas negativas, potencialmente reduzindo perdas por lixiviação. No entanto, devido às baixas dosagens, as transformações minerais não são detectáveis por técnicas instrumentais diretas, sendo necessário usar métodos indiretos para avaliar mudanças nas propriedades físico-químicas do solo.

Entretanto, Krahel et al. (2022) conduziu outro experimento em casa de vegetação com ciclos sucessivos de milho e variadas doses de remineralizadores, onde se investigou a liberação de elementos e formação de novos minerais pelo biointemperismo na rizosfera de milho em rochas basálticas, biotita-xisto e biotita-sienito. Os resultados desse estudo mostraram que as rochas forneceram nutrientes às plantas, com elementos como K, Ca, Mg e outros analisados na matéria seca. Difractogramas de raios-X (DRX) revelaram que o basalto manteve sua mineralogia enquanto o intemperismo da biotita resultou na formação de hidrobiotita, especialmente na biotita-xisto, que apresentou maior produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes. A CTC aumentou significativamente na biotita-xisto, sendo relevante para solos tropicais com baixa retenção de cátions, de acordo com a equação 1, o intemperismo da biotita pode formar vermiculita, mineral com alta CTC e ASE.



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 remineralizadores, 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, é um indicativo de que o biointemperismo induzido pelas plantas não só libera nutrientes essenciais, mas também promove mudanças duradouras nas propriedades físico-químicas do solo (Krahl et al. 2022, Martins et al. 2023). Isso sugere que, com o uso contínuo de remineralizadores, é possível desenvolver um manejo agrícola mais eficiente e sustentável, capaz de atender às demandas nutricionais das culturas sem a necessidade de grandes quantidades de fertilizantes solúveis. Esse avanço é particularmente relevante em regiões com solos altamente intemperizados, onde a baixa retenção de nutrientes é um desafio constante.

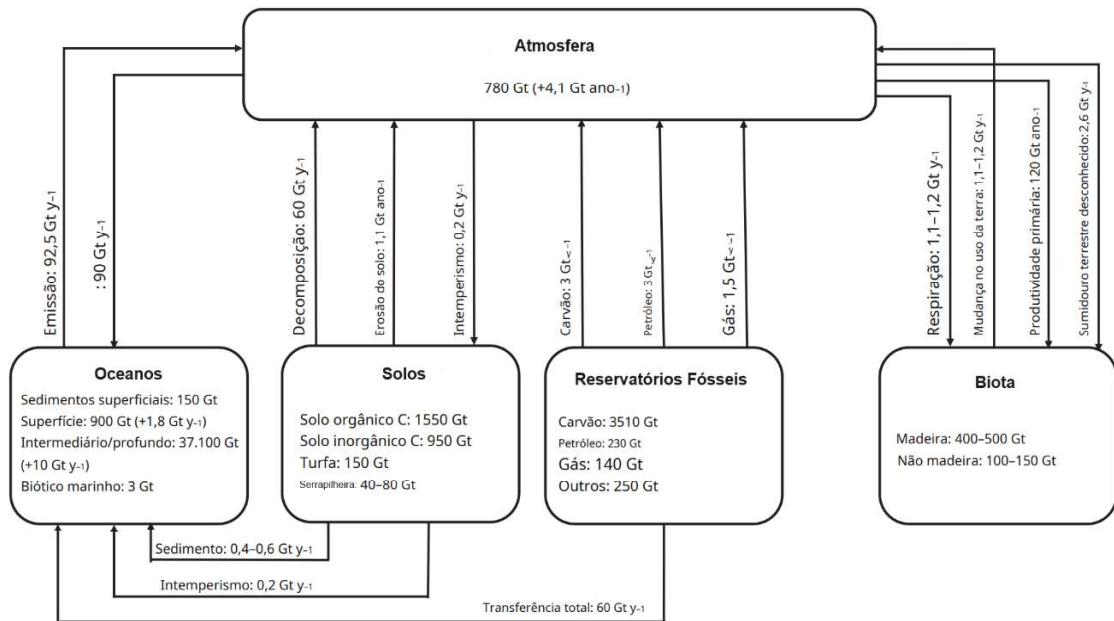
Carbono Orgânico do Solo e sua estabilização

O carbono no solo (C) está presente em formas orgânicas e inorgânicas. O carbono orgânico do solo (COS) provém da decomposição de materiais vegetais, animais e microrganismos, enquanto o carbono inorgânico (SIC) 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 SIC até 1 metro de profundidade (Figura 5; Lal, 2008). O COS é essencial para a saúde do solo e a sustentabilidade agrícola, sendo a sua estabilização fundamental no sequestro de carbono e na mitigação das mudanças climáticas (Lehmann & Kleber, 2015; Six et al., 2002). Minerais de baixa cristalinidade, como os amorfos, facilitam a estabilização da matéria orgânica do solo (MOS) por meio da adsorção de compostos orgânicos, especialmente em solos tropicais e ecossistemas costeiros, contribuindo para a retenção de nutrientes e a dinâmica do carbono e nitrogênio (Grant et al., 2022; Jilling et al., 2024; Tong et al., 2024). Essas interações são essenciais para mitigar as emissões dos gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade dos ecossistemas (Tong et al., 2024).

As interações entre a matéria orgânica e os minerais do solo ocorrem por meio de adsorção, que prende fisicamente a matéria orgânica à superfície mineral, e oclusão, que encapsula a matéria orgânica em agregados ou microporos, protegendo-a da decomposição microbiana e de processos abióticos (Kleber et al., 2015c). Além disso, a formação de complexos organo-minerais contribui significativamente para o sequestro de carbono e sua estabilização no solo, influenciando o ciclo global do carbono e a fertilidade do solo (Kleber et al., 2021). Minerais amorfos desempenham papel importante na dinâmica de nutrientes, mitigando a perda de carbono e promovendo a sustentabilidade agrícola (Chi et al., 2022). Minerais como filossilicatos, esmectitas e óxidos de ferro e alumínio também influenciam a estabilização do carbono orgânico do solo (COS),

com solos ricos em esmectitas mostrando maior estabilização devido à sua alta superfície específica e CTC (Jobbágy & Jackson, 2000; Wang et al., 2020).

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



Fonte: adaptado de Lal, 2008.

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). Pequenas variações no teor de carbono do solo 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).

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 superfície específica (ASE) e capacidade de troca catiônica (CTC) 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 CO₂ (Lehmann & Kleber, 2015). Solos alofânicos e cloríticos, por exemplo, mostram menor labilidade do COS do que solos caulínicos 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 (Kuzakov & 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 remineralizadores 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 remineralizadores na mineralogia do solo e no sequestro de carbono é uma área de pesquisa em expansão, especialmente relevante para estratégias de mitigação das mudanças climáticas (Basak et al., 2016).

CONCLUSÃO

Com base na revisão da literatura, os remineralizadores de solo têm mostrado um grande potencial para melhorar a fertilidade do solo e promover práticas agrícolas mais sustentáveis. Esses materiais oferecem uma alternativa eficaz aos fertilizantes químicos sintéticos, aumentando a capacidade de troca catiônica (CTC) e a retenção de nutrientes em solos tropicais, como os Latossolos. Além disso, os remineralizadores contribuem para o sequestro de carbono, ajudando a estabilizar a matéria orgânica no solo e a mitigar as emissões de CO₂, um fator crucial diante das mudanças climáticas globais.

No entanto, é importante ressaltar que, apesar dos benefícios evidentes, ainda são necessários mais estudos de campo para avaliar os efeitos de longo prazo e a viabilidade econômica do uso dos remineralizadores em diferentes condições edafoclimáticas. À medida que novas pesquisas avançam, espera-se que o uso de remineralizadores 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 de como o uso de REM pode melhorar a estabilidade da matéria orgânica e contribuir para uma agricultura mais sustentável, com menor

dependência de insumos externos e maior eficiência no uso de recursos naturais (Buss et al., 2023; Glorieux & Delmelle, 2022).

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.
- 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/. Acesso em: 09 jun. 2024.
- 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.; SARKAR, B.; BISWAS, D. R.; SANDERSON, P. Clay minerals and zeolites as soil amendments for water retention in surface soil: Implications to improve plant growth. **Applied Clay Science**, v. 126, p. 42-51, 2016.
- 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.
- 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>.
- 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.
- 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>.
- 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.
- 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. <https://doi.org/10.1201/b11267>.
- CHURCHMAN, G. J.; SINGH, M.; SCHAPPEL, 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.

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.

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>.

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. <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 CO₂ 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.

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. **Environmental Science & Technology**. DOI: 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: <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.

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.

JOBÁGY, 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. <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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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/doi/10.1038/nature16069>.
- LUCESSE, 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.
- 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>.
- NIMANKA, S.; FERNANDO, N.; DE SILVA, M.; MUNAWEERA, I.; KOTTEGODA, N. Climate Smart Agriculture: The Role of Fertilizer Innovations and Efficient Plant Nutrient Management. **Vidyodaya Journal of Science**, v. 1, s1, 2023.
- 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.
- 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, 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. <https://doi.org/10.1590/1983-40632021v5166691>.
- 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.
- 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 catiônica. **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>.
- 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.
- 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.
- 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. <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.; LILIENFEIN, 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>.