



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**ESTOQUE DE CARBONO, FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA E FERTILIDADE  
DO SOLO MANEJADO COM AGROMINERAIS SILICÁTICOS SOB PASTAGEM  
NO CERRADO**

**PRISCILA BRELAZ DA SILVA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA**

**BRASÍLIA/DF**  
**MAIO/2025**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**ESTOQUE DE CARBONO, FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA E FERTILIDADE  
DO SOLO MANEJADO COM AGROMINERAIS SILICÁTICOS SOB PASTAGEM  
NO CERRADO**

**PRISCILA BRELAZ DA SILVA**

**ORIENTADORA:** DRa. ANA MARIA RESENDE JUNQUEIRA  
**CO-ORIENTADOR:** DR. JOÃO PAULO GUIMARÃES SOARES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA**

**BRASÍLIA/DF**  
**MAIO/2025**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**ESTOQUE DE CARBONO, FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA E FERTILIDADE  
DO SOLO MANEJADO COM AGROMINERAIS SILICÁTICOS SOB PASTAGEM  
NO CERRADO**

**PRISCILA BRELAZ DA SILVA**

**APROVADA POR:**

---

**ANA MARIA RESENDE JUNQUEIRA (Orientadora)**  
Professora Doutora, Universidade de Brasília, [anamaria@unb.br](mailto:anamaria@unb.br)

---

**CÍCERO CÉLIO DE FIGUEIREDO (Avaliador Interno)**  
Professor Doutor, Universidade de Brasília, [cicerocf@unb.br](mailto:cicerocf@unb.br)

---

**GIULIANO MARCHI (Avaliador Externo)**  
Pesquisador Doutor, Embrapa Cerrados, [giuliano.marchi@embrapa.br](mailto:giuliano.marchi@embrapa.br)

**BRASÍLIA/DF, MAIO de 2025**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Se Silva, Priscila Brelaz da  
Estoque de carbono, frações da matéria orgânica e fertilidade do solo manejado com agrominerais silicáticos sob pastagem no Cerrado / Priscila Brelaz da Silva; orientador Ana Maria Resende Junqueira; co-orientador João Paulo Guimarães Soares. Brasília, 2025.  
72 p.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade de Brasília, 2025.

1. Carbono do solo. 2. Biotita-xisto. 3. Kamafugito. 4. Basalto. 5. Urochloa brizantha. I. Junqueira, Ana Maria Resende, orient. II. Soares, João Paulo Guimarães, co-orient. III. Título.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, P. B. **Estoque de carbono, frações da matéria orgânica e fertilidade do solo manejado com agrominerais silicáticos sob pastagem no Cerrado**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2025. Dissertação de Mestrado.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Priscila Brelaz da Silva

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: **Estoque de carbono, frações da matéria orgânica e fertilidade do solo manejado com agrominerais silicáticos sob pastagem no Cerrado**.

GRAU: Mestre ANO: 2025

É concedida à Universidade de Brasília de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

Nome: Priscila Brelaz da Silva

CPF: 887.011.152-00

Endereço: Condomínio Estância Del Rey, Brasília-DF

E-mail: ppbrelaz2@gmail.com

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas misericórdias que se renovam a cada manhã. Aos meus pais, Walcir e Ivonilce, pelo amor, apoio e incentivo irrestritos. Sem eles eu não teria chegado até aqui. Às minhas irmãs, por serem minhas melhores amigas e grande suporte nessa jornada. Ao meu cunhado, Rubinho, por todo o companheirismo e cuidado. Aos meus sobrinhos, João e André, que alegam e dão muito sentido à minha vida. À minha amiga Talita, pelo carinho e incentivo. À querida Marleninha e família, pela torcida e momentos tão felizes de convivência.

À Universidade de Brasília, à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, professores e servidores, por proporcionarem uma formação de qualidade e abrangente. Agradeço aos professores Dra. Ana Maria Resende Junqueira e Dr. João Paulo Guimarães Soares por aceitarem o desafio da orientação, pela atenção disponibilizada e por me proporcionarem uma vivência tão rica na UnB e Embrapa Cerrados para a construção deste trabalho. Ao professor Dr. Cícero Célio Figueiredo, pelo treinamento no Laboratório de Matéria Orgânica do Solo (LABMOS/UnB) e pelas disciplinas mais marcantes da minha jornada acadêmica. À Priscila Reis, servidora do LABMOS/UnB, pelo treinamento e atenção à minha pesquisa. Às minhas amigas mais próximas de curso, Wênia e Samara, que dividiram muitas alegrias e desafios ao longo desses anos na UnB.

Quero externar meu agradecimento à Embrapa Cerrados pela oportunidade singular de aprofundar competências e habilidades, além de proporcionar as condições para a realização da pesquisa. Agradeço aos pesquisadores Dr. Éder Martins e Dr. Giuliano Marchi pela escuta atenta, orientação e por todo o apoio e incentivo na jornada acadêmica. Agradeço imensamente aos pesquisadores Dra. Arminda Carvalho e Dr. Marcos Carolino pelos conselhos, disponibilidade, paciência e orientação tão cuidadosa. Foi uma honra ser orientada por vocês. À Luise Krahel e à Elis Marina, por todas as orientações, conselhos e incentivo. Minha gratidão ao Ewerton e Luiz Fernando pelos conhecimentos compartilhados, pelo apoio e supervisão nas atividades do laboratório. Aos meus queridos companheiros de equipe: Layane, Daiane, Sarah, Ellen, Ana, Marcos Vinícios, por toda parceria e momentos agradáveis. À equipe Dinâmica do Carbono — Thaís, Fabiana, Raíssa, Carol, Fernanda, Douglas, Ícaro, Alex, Ruan, Heloísa e Rayane — que contribuíram para a realização deste trabalho. Ao Juaci Malaquias, por todas as orientações nas análises estatísticas e boas conversas. Ao Delvico por toda paciência e por transmitir seu conhecimento com tanta dedicação. A todos os colaboradores e bolsistas da Embrapa Cerrados, em especial a querida Michelli, pela convivência agradável e por

contribuírem de maneira direta e indireta para a realização da pesquisa. À querida Gabrielle pela escuta tão profissional, sensível e ética na terapia. Finalmente, à Funarbe, à Vale e à Embrapa Cerrados, pela concessão da bolsa de estudos.

## RESUMO

O uso de agrominerais silicáticos tem sido proposto como alternativa promissora para melhorar a fertilidade dos solos tropicais, mitigar processos de degradação e contribuir com práticas agrícolas sustentáveis, especialmente frente à crescente demanda por insumos e à dependência externa de fertilizantes. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito de agrominerais silicáticos – biotita-xisto, kamafigito e basalto – nos estoques de carbono, nas frações da matéria orgânica do solo (MOS), na estabilidade de agregados e nos atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob cultivo de *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás, após sete anos da implantação do experimento. O experimento foi conduzido em área experimental da Embrapa Cerrados, no Distrito Federal, utilizando delineamento em blocos ao acaso, com cinco tratamentos e três repetições. Os tratamentos consistiram na aplicação de 40 t ha<sup>-1</sup> de basalto, 151 t ha<sup>-1</sup> de biotita-xisto, 40 t ha<sup>-1</sup> de kamafigito, 0,33 t ha<sup>-1</sup> de KCl e um controle sem adição de fonte de potássio. As análises abrangeram as frações húmicas e granulométricas da MOS, estoques de carbono, atributos físicos (como densidade, floculação e agregação) e parâmetros químicos do solo (pH, macro e micronutrientes, CTC, Al<sup>3+</sup>, H+Al, e V). Os resultados indicaram que, apesar da hipótese de aumento no carbono do solo e na sua estabilidade por meio do uso de agrominerais, não foram observadas diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) entre os tratamentos em relação aos estoques de carbono, às frações químicas e físicas da MOS ou aos atributos químicos do solo, com exceção de micronutrientes. Os teores de carbono orgânico particulado (COP) representaram mais de 50% do carbono total nas camadas superficiais, destacando a relevância da entrada de resíduos vegetais. A fração associada aos minerais (COAM), mais estável, apresentou diminuição nos tratamentos com agrominerais, o que pode estar relacionado ao efeito *priming* e à elevação do pH, tornando a matéria orgânica mais suscetível à decomposição. Dentre os tratamentos, apenas a floculação apresentou diferença significativa, com valores médios de 73,74% para o biotita-xisto, 76,01% para o basalto e 77,15% para o kamafigito. De forma geral, o uso prévio de corretivos alcalinizantes e fertilizantes na implantação, bem como a remoção sistemática da biomassa, podem ter limitado a expressão dos efeitos dos agrominerais ao longo do tempo. Conclui-se que, nas condições avaliadas, os agrominerais silicáticos não promoveram acréscimos estatisticamente significativos nos estoques de carbono nem nas frações da MOS após sete anos de cultivo com *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás. Ainda assim, o estudo contribui para preencher lacunas na literatura, especialmente por englobar a análise do fracionamento químico da MOS, ainda não explorado em pesquisas com rochas silicáticas. Recomenda-se o desenvolvimento de novos estudos em longo prazo, que incluam avaliações comparativas com áreas nativas ou

mensurações prévias ao manejo, bem como a consideração de frações orgânicas mais sensíveis à variação de manejo, a exemplo de carbono da lábil ou o carbono orgânico dissolvido.

**Palavras-Chave:** Carbono do solo; Biotita-xisto; Kama fugito; Basalto, *Urochloa brizantha*



## ABSTRACT

The use of silicate agrominerals has been proposed as a promising alternative to improve the fertility of tropical soils, mitigate degradation processes, and contribute to sustainable agricultural practices, especially in light of the growing demand for inputs and the external dependence on fertilizers. In this context, the present study aimed to evaluate the effect of silicate agrominerals—biotite-schist, kamafugite, and basalt—on carbon stocks, soil organic matter (SOM) fractions, aggregate stability, and chemical attributes of a dystrophic Red-Yellow Latosol under cultivation of *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás, after seven years of the experiment's implementation. The experiment was conducted at the Embrapa Cerrados experimental area, in the Federal District, using a randomized block design with five treatments and three replications. Treatments consisted of the application of 40 t ha<sup>-1</sup> of basalt, 151 t ha<sup>-1</sup> of biotite-schist, 40 t ha<sup>-1</sup> of kamafugite, 0.33 t ha<sup>-1</sup> of KCl, and a control with no potassium source added. Analyses encompassed humic and granulometric SOM fractions, carbon stocks, physical attributes (such as density, flocculation, and aggregation), and soil chemical parameters (pH, macro- and micronutrients, CEC, Al<sup>3+</sup>, H+Al, and base saturation). The results indicated that, despite the hypothesis of increased soil carbon and stability through the use of agrominerals, no significant differences ( $p > 0.05$ ) were observed among treatments regarding carbon stocks, chemical and physical SOM fractions, or soil chemical attributes, with the exception of micronutrients. Particulate organic carbon (POC) levels accounted for more than 50% of total carbon in surface layers, highlighting the importance of plant residue input. The mineral-associated fraction (MAOC), which is more stable, showed a decrease in the agromineral treatments, which may be related to the priming effect and pH elevation, making organic matter more susceptible to decomposition. Among the treatments, only flocculation showed a significant difference, with average values of 73.74% for biotite-schist, 76.01% for basalt, and 77.15% for kamafugite. Overall, the prior use of alkalinizing amendments and fertilizers during implementation, as well as the systematic removal of biomass, may have limited the expression of agromineral effects over time. It is concluded that, under the evaluated conditions, silicate agrominerals did not promote statistically significant increases in carbon stocks or SOM fractions after seven years of cultivation with *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás. Nevertheless, the study contributes to filling gaps in the literature, especially by including the analysis of the chemical fractionation of SOM, which has not yet been explored in research with silicate rocks. The development of new long-term studies is recommended, including comparative evaluations with native areas or prior measurements before management, as well

as the consideration of organic fractions more sensitive to management variations, such as labile carbon or dissolved organic carbon.

**Keywords:** Soil carbon; Biotite-schist; Kamafugite; Basalt; *Urochloa brizantha*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> Variação da média mensal de precipitação e temperatura na estação experimental Embrapa Cerrados, Planaltina, Distrito Federal, entre os anos de 2013 e 2023.....	17
<b>Figura 2.</b> Amostragem de solo em anel volumétrico de 100 cm <sup>3</sup> .....	21
<b>Figura 3.</b> Amostragem de solo com trado calador para camada de 10 cm (A) e 20 cm (B)....	21
<b>Figura 4.</b> Densidade do solo nos diferentes tratamentos cultivados com <i>Urochloa brizantha</i> cv. Paiaguás, por sete anos, nas camadas 0-60 cm. Os tratamentos não apresentaram diferença significativa pelo teste F ( $p > 0,05$ ). ....	29
<b>Figura 5.</b> Média da distribuição de agregados estáveis em água (%), por classe de tamanho (mm), nos diferentes tratamentos na camada 0-60 cm. Os tratamentos não apresentaram diferença significativa pelo teste F ( $p > 0,05$ ). ....	32
<b>Figura 6.</b> Estoques de carbono do solo (Mg ha <sup>-1</sup> ) nos diferentes tratamentos em diferentes camadas do solo (0-60 cm) cultivado com <i>Urochloa brizantha</i> cv. Paiaguás, por sete anos. Tratamentos sem diferença significativa pelo teste F ( $p > 0,05$ ). ....	34
<b>Figura 7</b> Teor de C (g kg <sup>-1</sup> ) nas frações particulada (COP), associada aos minerais (COAM) e carbono total (CT) pelo fracionamento físico granulométrico nos diferentes tratamentos cultivados com <i>Urochloa brizantha</i> cv. Paiaguás, por sete anos, nas camadas 0-30 cm. Tratamentos sem diferença significativa pelo teste F ( $p > 0,05$ ). ....	37
<b>Figura 8.</b> Teor de C (g kg <sup>-1</sup> ) nas frações ácido fúlvico (C-AF), ácido húmico (C-AH), humina (C-HUM), pelo fracionamento químico das substâncias húmicas, e carbono orgânico total por combustão úmida (COT) nos diferentes tratamentos cultivados com <i>Urochloa brizantha</i> cv. Paiaguás, por sete anos, nas camadas 0-30 cm. Tratamentos sem diferença significativa pelo teste F ( $p > 0,05$ ). ....	39

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Caracterização química inicial do solo da área experimental na camada de 0-20 cm. ....	18
<b>Tabela 2.</b> Composição química dos principais elementos das rochas basalto, biotita xisto e kamafeugito .....	19
<b>Tabela 3.</b> Composição mineralógica das rochas basalto, biotita xisto e kamafeugito. ....	19
<b>Tabela 4.</b> Teores médios de areia, silte e argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ) nos tratamentos no perfil 0-30 cm em Latossolo Vermelho-Amarelo. ....	30
<b>Tabela 5.</b> Porcentagem de floculação dos tratamentos por classe de camada em Latossolo Vermelho-Amarelo. ....	32
<b>Tabela 6.</b> Porcentagem de diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) dos tratamentos no perfil 0-60 cm em Latossolo Vermelho-Amarelo. ....	33
<b>Tabela 7.</b> Atributos químicos do solo sob cultivo de U. brizantha cv. BRS Paiaguás após sete anos da incorporação de minerais silicáticos em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico no Cerrado na camada 0-10 cm. ....	42
<b>Tabela 8.</b> Teor de micronutrientes Zn, Fe Mn e Cu do solo sob cultivo de U. brizantha cv. BRS Paiaguás após sete anos da incorporação de minerais silicáticos em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico no Cerrado na camada 0-10 cm. ....	42

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
2.1 AGROMINERAIS SILICÁTICOS NA AGRICULTURA .....	4
2.2 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO.....	8
2.2.1 Mecanismos de estabilização .....	8
2.2.2 Fracionamento da matéria orgânica do solo .....	11
2.3 BOTÂNICA E POTENCIAL PRODUTIVO DA <i>Urochloa brizantha</i> .....	13
<b>3. HIPÓTESES E OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
3.1 HIPÓTESES .....	16
3.2 OBJETIVOS.....	16
3.2.1 Objetivo Geral.....	16
3.2.2 Objetivos Específicos.....	16
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>17</b>
4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL .....	17
4.2 IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO .....	18
4.3 AMOSTRAGEM DE SOLO .....	20
4.4 ANÁLISES LABORATORIAIS .....	21
4.4.1 Determinação da Densidade do Solo.....	21
4.4.2 Distribuição de Agregados Estáveis ao Peneiramento Úmido.....	22
4.4.3 Teor e estoque de Carbono Orgânico Total do Solo (CHNS/O).....	24
4.4.4 Fracionamento da matéria orgânica do solo .....	25
4.4.5 Análises dos atributos químicos do solo .....	27
<b>5. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....</b>	<b>28</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>29</b>
6.1 DENSIDADE DO SOLO .....	29
6.2 GRANULOMETRIA .....	30
6.3 ESTABILIDADE DE AGREGADOS .....	30
6.4 ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO TOTAL DO SOLO .....	33
6.5 FRACIONAMENTO FÍSICO DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO.....	34
6.6 FRACIONAMENTO QUÍMICO DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO .....	38
6.7 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO .....	39
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>45</b>

<b>ANEXOS.....</b>	<b>58</b>
--------------------	-----------

## 1. INTRODUÇÃO

A demanda mundial por alimentos, dentre os quais proteína animal, bem como fibras e energia tem impulsionado a integração de tecnologias e a utilização cada vez maior de insumos agrícolas, com o intuito de intensificar os sistemas de produção. No que se refere ao solo, os fertilizantes estão entre os insumos mais difundidos, demandados e dispendiosos com o objetivo de alcançar o máximo potencial produtivo das culturas (Farias *et al.*, 2020; Ogino *et al.*, 2021). Para tanto, a cada ano são demandadas maiores quantidades de fertilizantes, em particular, os de origem mineral com elevados teores de nutrientes, dos quais, o Brasil importou, em 2024, 44.256.973 toneladas (Brasil, 2025), cerca de 85% do quantitativo necessário para abastecer o mercado interno (ANDA, 2024). No mesmo ano, tais importações representaram um fluxo comercial de 13,5 bilhões de dólares, confirmando a magnitude do mercado voltado à nutrição de plantas no Brasil (Brasil, 2025).

Atualmente, a maior dependência do Brasil está relacionada à importação de potássio, visto que 97% são adquiridos de outros países (Ustinova, 2022), dos quais, 75% provenientes do Canadá, Rússia e Alemanha (World Bank, 2024). A dependência externa, somada às crises geopolíticas, representam riscos à estabilidade no abastecimento de fertilizantes e, por conseguinte, aos suprimentos gerados pelo agronegócio brasileiro (Ogino; Gasques; Viera Filho, 2023). O desafio se torna ainda maior, tendo em vista a extensão de áreas cultivadas e o estado de conservação e fertilidade dos solos, podendo impactar a segurança alimentar no Brasil e no mundo.

Nas décadas recentes, verificou-se uma significativa expansão da fronteira agrícola no Brasil (Souza Júnior *et al.*, 2020; Caballero; Ruhoff; Biggs, 2022). Estima-se que, em 1985, o cultivo agrícola e de pastagens ocupavam juntos 187.353.381 ha, do território brasileiro, ao passo que em 2022 o quantitativo ascendeu a 282.496.685 ha (MapBiomas, 2023). As pastagens cultivadas, particularmente, estão presentes em todos os biomas do país e figuram como a principal classe de uso da terra (Santos *et al.*, 2022a). Em 2022, estima-se que 164 Mha do território nacional foram empregados no cultivo de gramíneas para pasto, dos quais, aproximadamente, 31,20% (51.366.258,69 ha) estavam concentrados no Bioma Cerrado, uma savana tropical (MapBiomas, 2023). Contudo, estudos registram que, desse total, aproximadamente 39% das pastagens no Cerrado apresentam algum estágio de degradação (Pereira *et al.*, 2018; Vieira, *et al.*, 2021). Em nível nacional, a deterioração dos solos da área cultivada com pastagens supera os 50% (Santos *et al.*, 2022b) resultando em progressiva redução da qualidade do solo e declínio na produtividade (Gosch *et al.*, 2021).

O uso da terra e as alterações de cobertura figuram como fatores determinantes nas emissões e remoções de gases do efeito estufa (GEE) (Brasil, 2020). Frente aos cenários de mudanças climáticas, é imperativo promover medidas e abordagens de manejo que sejam mais sustentáveis e conservacionistas em sinergia com a produção agrícola (IPCC, 2022), como os modelos regenerativos. Esses modelos são estratégias que contribuem para restaurar as funções do solo, ciclagem de nutrientes, melhorar sua qualidade e garantir, concomitantemente, sustentabilidade e produções potenciais das culturas (Newton *et al.*, 2020; Schreefel *et al.*, 2020; Schulte *et al.*, 2021; Khangura *et al.*, 2023).

É neste contexto que os minerais silicáticos podem ser uma estratégia alternativa local e de longo prazo com o intuito de mitigar processos de degradação de (Theodoro *et al.*, 2021) e contribuir para melhorar a fertilidade do solo, propiciado pela liberação gradativa de nutrientes de plantas tais como o potássio, cálcio e magnésio (Nunes; Kautzmann; Oliveira, 2014; Ramos *et al.*, 2017; Manning *et al.*, 2017; Ferreira *et al.*, 2020), consequentemente, reduzir a dependência externa de fertilizantes (Ustinova, 2022; Burbano *et al.*, 2022; Benevides Filho *et al.*, 2023; Ogino, Gasques, Viera Filho, 2023; World Bank, 2024).

Concomitantemente, materiais geológicos, tais como rochas silicáticas, à medida que sofrem reações relativas ao intemperismo acelerado, capturam e fixam carbono no solo (Hartmann *et al.*, 2013; Lefebvre *et al.*, 2019; Kelland *et al.*, 2020; Ramos *et al.*, 2022). Ademais, esses minerais são potenciais estabilizadores de matéria orgânica do solo (MOS) com efeito de fixar carbono no compartimento terrestre (Buss *et al.*, 2023). Semelhantemente, registra-se que o uso de minerais de interesse agrônômico apresenta potencialidades para favorecer a formação e estabilidade de agregados em razão das interações estabelecidas com a MOS e minerais presentes no solo (Mao *et al.*, 2020). As fontes orgânicas, vegetais e microbiológicas, atuam como agentes de controle do intemperismo (Corbett *et al.*, 2024) e são, igualmente, capazes de modular a comunidade de microrganismos que se formam durante o processo (Reis *et al.*, 2024).

Do ponto de vista estratégico, o uso de agrominerais silicáticos contribui para enfrentar a crise global por fertilizantes (Burbano *et al.*, 2022; Benevides Filho *et al.*, 2023) em convergência com os princípios e práticas conservacionistas preconizados e incentivados por organismos nacionais e internacionais (IPCC, 2006). O manejo do solo, especialmente no que diz respeito a MOS, é um elemento central capaz de influenciar a dinâmica do carbono entre os compartimentos atmosférico e terrestre. Ressalta-se que ainda são escassos os trabalhos de longo prazo que relacionem o efeito de minerais silicáticos nos teores de carbono orgânico do solo (COS) assim como das frações lábeis e recalcitrantes da MOS. Isso posto, há a necessidade



de se estimar e compreender, a campo, a influência dos agrominerais silicáticos em condições tropicais, quanto ao estoque de carbono orgânico no solo e, por conseguinte, sua contribuição para agricultura de baixo carbono, além de seu uso no aprimoramento nas práticas de manejo sustentável do solo e recuperação de pastagens degradadas.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 AGROMINERAIS SILICÁTICOS NA AGRICULTURA

Produtos derivados de materiais geológicos são utilizados há séculos na agricultura como fontes de nutrientes ou condicionadores de solo (Van Straaten, 2006; Van Straaten, 2007). Recentemente, tecnologias industriais ampliaram o espectro de produtos e possibilidades de aplicação, influenciando os avanços produtivos (Ciceri; Manning; Allanore, 2015). Um bom exemplo é o calcário agrícola, utilizado em larga escala para correção da acidez do solo, o que aumenta a disponibilidade e absorção de nutrientes, tornando solos tropicais adequados ao cultivo (Fageria; Baligar, 2001; Prado *et al.*, 2012). O uso de insumos agrícolas ao longo do tempo se intensificou, especialmente em função do aumento da demanda por produtos agrícolas a exemplo de alimentos, fibras e energia. Insumos para correção e fertilidade do solo são, portanto, estratégias fundamentais para atender as demandas e intensificação do sistema de produção.

Nesse contexto, a expansão populacional e demanda por produtos agrícolas tem elevado a demanda pela intensificação do uso da terra e de fertilizantes. E com isso o desafio para balancear a exportação de nutrientes do solo pelas culturas e a capacidade de repor esses elementos via fertilização mineral (Manning, 2015). Esse quadro é particularmente agravado no que se refere à reposição de potássio em solos tropicais intemperizados, visto que tal elemento apresenta maior risco de perda por lixiviação, agravado pelo fato das fontes naturais deste elemento serem concentradas no hemisfério norte, com altos custos de importação e transporte (Manning, 2017). Diante disso, esforços têm sido realizados ao longo de décadas para garantir o abastecimento do mercado e desenvolver estratégias que garantam a sustentabilidade da cadeia do agronegócio a longo prazo (Ciceri; Manning; Allanore, 2015), como o uso de agrominerais silicáticos.

O uso de agrominerais silicáticos, compreendidos como materiais rochosos de origem mineral triturados por processos mecânicos (Brasil, 2013; 2016), é uma alternativa aos fertilizantes industriais solúveis para o manejo da fertilidade e qualidade do solo, podendo contribuir para mitigação das mudanças climáticas (Zhang *et al.*, 2018; Ramos *et al.*, 2022; Benevides Filho *et al.*, 2023). Assim, além da geração estratégica de produtos à base de materiais minerais nacionais, diminuindo a dependência externa de fertilizantes, o uso de

agrominerais silicáticos na agricultura podem contribuir com o setor de mineração no Brasil, pela possibilidade de reutilização na agricultura de resíduos deste setor (Benevides Filho *et al.*, 2023; Ogino, Gasques, Viera Filho, 2023).

No que tange ao descarte de rejeitos de mineradoras, prevê-se que a quantidade anual atinja, em 2030, o patamar de 684 milhões de toneladas de rejeito (Ipea, 2012). Isso posto, acredita-se que, após caracterização, comprovação de conformidade e eficiência agrônômica (Brasil, 2013; 2016), parte dos rejeitos gerados pela mineração poderiam ser adotados como subprodutos na agricultura (Tavares *et al.*, 2018; Ramos *et al.*, 2022). Para tanto, avaliações diversificadas são necessárias para caracterizar estes materiais, identificar os principais fatores associados ao seu intemperismo e apontar efeitos - diretos, indiretos ou conjugados - e melhores conduções de manejo agrícola, para que eles se tornem insumos (Martins *et al.*, 2008; Swoboda; Döring; Harmer, 2022).

Estudos de caracterização são fundamentais para identificar minerais que apresentem constituintes de interesse agrônômico, maior reatividade e potencial de solubilização. Caracterizações petrográficas e mineralógicas contribuem para identificar a alocação dos nutrientes nos minerais e compreensão dos fatores que influenciam a cinética de dissolução dos elementos da fase mineral para a solução do solo, da qual as plantas realizam sua absorção (Blaskowski *et al.*, 2018). Corroborando com esta visão, Martins *et al.* (2008) afirmam que resultados insatisfatórios em alguns testes são, por vezes, resultado da incipiência de dados fundamentais, a exemplo do potencial de solubilidade do mineral e, por conseguinte, escolha de materiais sem aptidão para aplicação agrícola. Registra-se, portanto, que a análise pormenorizada, associada a ferramentas analíticas adequadas, pode aprofundar a precisão das pesquisas e aplicabilidade dos insumos minerais.

Nesse sentido, estudos aplicados com foco na caracterização de rochas e minerais contribuem para aprofundar a compreensão sobre fatores que condicionam a dissolução de nutrientes a partir de minerais. Isso é possível, por exemplo, por meio da caracterização petrográfica e da correlação com tamanho de partículas e propensão à liberação de nutrientes (Ciceri *et al.*, 2017). Textura, fases mineralógicas, fraturas e alterações no mineral tem potencial para influenciar positivamente a cinética de liberação dos nutrientes ao meio. Tais resultados são relevantes, tendo em vista que técnicas de fracionamento mecânico poderiam ser adotadas como uma maneira de diminuir a resistência de determinados materiais à dissolução. De acordo com os pesquisadores, as análises petrográficas podem representar critério importante para

estimar parâmetros granulométricos mais adequadas em aumentar a efetiva liberação de nutrientes do sólido mineral.

Semelhantemente, Ramos *et al.* (2017), a partir de amostras do sul do Brasil, demonstraram como caracterizações petrográficas e mineralógicas são ferramentas importantes para identificar, nas rochas, fases mineralógicas mais suscetíveis ao intemperismo e, por essa razão, mais eficientes na dissolução de macro e micronutrientes. No estudo em questão, minerais silicáticos, a exemplo de piroxênio, plagioclásio foram descritos como minerais que sofrem o intemperismo de forma mais rápida. Outro fator relevante mencionado foram os resultados quanto à textura que indicaram condições adequadas de moabilidade que, por sua vez, aumentam a exposição do material a oxidação. De acordo com os autores, a exposição das partículas minerais a ácidos fracos presentes na solução do solo, potencialmente, promove a liberação gradativa de nutrientes. Dada a natureza estável de minerais silicáticos a transformação desses materiais no solo apresenta uma estreita relação com organismos vivos sejam eles plantas ou fauna, em particular, os microrganismos.

Plantas e microrganismos possuem papel crucial no intemperismo de minerais, tendo em vista que, dada a sua milenar adaptabilidade e associações, atuam mediando diversos processos na interface entre litosfera e biosfera fundamentais à pedogênese, ciclos biogeoquímicos e dinâmica dos ecossistemas (Wild, Gerrits e Bonneville, 2022). Sem dúvida, o caráter de baixa solubilidade em água representa, até o momento, um desafio à pesquisa com agrominerais silicáticos. Há, contudo, evidências de que tais insumos minerais podem sofrer processos de alterações mais acelerados à medida que são submetidos à influência e ação de microrganismos e da rizosfera de plantas (Krahl *et al.*, 2020). Todavia, a resposta dessa interação pode variar em função das espécies atuantes no processo (Manning, 2017; Swoboda; Döring; Harmer, 2022).

O biointemperismo, processo no qual rochas são alteradas por raízes e fauna do solo, favorece a transformação das distintas fases minerais sólidas, mediante processos físicos e químicos, a exemplo da corrosão da superfície de minerais (Baptista *et al.*, 2021), bem como aumentos nas taxas de reações de lixiviação via hidrólise (Burbano *et al.*, 2022), na produção de complexos ligantes e nas reações de oxirredução (Ribeiro *et al.*, 2020). Os referidos processos viabilizam, por sua vez, a liberação de nutrientes ao sistema solo-planta, de acordo com a composição mineralógica. Os achados são consistentes com as investigações de Tavares *et al.* (2018), Burbano *et al.* (2022) e Medeiros *et al.* (2023) que indicam interação positiva entre insumos minerais e resíduos orgânicos que, por seu turno, pela ação de microrganismos e

ácidos orgânicos, contribuem para aumentar a liberação gradual de nutrientes e elementos benéficos como o Si, promovendo o crescimento vegetal.

As plantas também são elementos fundamentais no processo de biointemperização dos materiais geológicos. A atividade biológica, em particular na rizosfera, pode atuar de forma direta na desagregação e dissolução dos constituintes de origem mineral ou, ainda, de forma indireta, beneficiando os microrganismos pelas condições favoráveis que se formam na região de influência do sistema radicular (Ribeiro *et al.*, 2020). Krahel *et al.* (2022a; 2022b) demonstraram que a interação de biotita xisto e biotita sienito moídas e aplicadas ao solo sob ação da rizosfera de *Zea mays* são capazes de promover o biointemperismo mesmo a curto prazo. Segundo os autores, processos de dissolução congruente viabilizam a disponibilidade de macro e micronutrientes que contribuem para nutrição de plantas. A dissolução incongruente, por sua vez, promoveu alterações mineralógicas, assim como processos de oxidação desencadearam aumentos na capacidade de troca catiônica (CTC). Ferreira *et al.* (2020), Reis *et al.* (2024) e Rodrigues *et al.* (2024a, 2024b), observaram que a *U. brizantha*, cultivada em solo contendo basalto, é capaz de influenciar, pelo biointemperismo, a liberação de nutrientes para o solo, a exemplo de  $K^+$   $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ . O aumento na disponibilidade desses nutrientes, por sua vez, resultou em melhorias na performance da *U. brizantha* tanto em biomassa quanto no acúmulo de nutrientes.

O processo de intemperismo possui estreita relação com ciclos biogeoquímicos que, notoriamente, influenciam aspectos climáticos e a dinâmica da biosfera (Hartmann *et al.*, 2013). O processo natural de intemperismo dos silicatos, por exemplo, exerce influência nos fluxos de  $CO_2$  na interface da atmosfera para os solos (Wild; Gerrits; Bonneville, 2022). Segundo Hartmann *et al.* (2013), Lefebvre *et al.* (2019) e Ramos *et al.* (2022), minerais constituintes de rochas silicáticas podem reagir com  $CO_2$ , em processos como dissolução e hidrólise, formando minerais carbonáticos que fixam o carbono e elevam o pH do meio pela liberação de cátions como Ca e Mg. De acordo com esses estudos, mecanismos como os de transformação de rochas silicáticas representam uma possível estratégia prática para contribuir com a mitigação das mudanças climáticas.

O número de publicações referentes à temática de biointemperismo de insumos minerais potencialmente úteis à agricultura tem aumentado (Basak *et al.*, 2018; Finlay *et al.*, 2020; Ribeiro *et al.*, 2020; Vicca *et al.*, 2021; Soumare *et al.*, 2023). Há, contudo, que se considerar a necessidade de aprimorar os estudos no que tange à escala de tempo em que os processos de intemperismo ocorrem. Por essa razão, tem sido proposto o intemperismo acelerado por meio

de mecanismos conjuntos, como uso de rochas moídas, constituídas de minerais mais propensos aos intemperismos químico, físico e biológico (Lefebvre *et al.*, 2019; Ramos *et al.*, 2022). Primordialmente, os autores citados focaram suas análises na captação de carbono na forma inorgânica. A partir de estudo realizado em vaso, Buss *et al.* (2023) observaram que a aplicação conjunta de basalto e granito moídos foram capazes de promover a estabilização de carbono orgânico ao solo com aumento da proteção física da MOS, sobretudo, na fração particulada. Nessa perspectiva, os autores sugerem que materiais de origem mineral intemperizados poderiam atuar na fixação de carbono ao compartimento solo. Existe, no entanto, escassez de informação quanto ao papel do intemperismo de rochas silicáticas na estabilização de carbono na forma orgânica em solos tropicais em testes a campo e, principalmente, de longa duração.

## 2.2 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

### 2.2.1 Mecanismos de estabilização

Os agroecossistemas têm sido cada vez mais estudados sob a perspectiva da sustentabilidade ao tratar de forma associada fatores como produção agrícola, preservação, conservação e qualidade dos recursos naturais. O solo é um recurso natural multifuncional que, em razão de sua diversidade e interações, atua em funções vitais tais como: produção de alimentos, ciclagem de nutrientes, regulação de ciclo da água, manutenção da biodiversidade, armazenamento de C e serviços ambientais (Kopittke *et al.*, 2022). No que tange ao aspecto climático, os solos são considerados, em escala global, importantes mediadores na regulação climática, em razão da capacidade de atuarem como fonte ou dreno de CO<sub>2</sub> (Ferreira *et al.*, 2016), conseqüentemente, com potencial de estocar C e mitigar GEE, dependendo do seu uso agrícola ou sob vegetação nativa (Carvalho *et al.*, 2023). É nesse cenário que práticas agrícolas são potenciais mitigadoras nas emissões antrópicas dos gases de efeito estufa através do armazenamento e sua capacidade de estocar C (IPCC, 2022; Carvalho *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2024).

Os solos são considerados o maior reservatório ativo de C no ecossistema terrestre (Janzen, 2004; Lehmann e Kleber, 2015). Tendo em vista a magnitude espacial desse compartimento, mudanças no balanço de C podem exercer impactos significativos no ciclo desse elemento entre os reservatórios, a exemplo da atmosfera, biomassa vegetal e microbiana (Lal, 2013; Minasny, *et al.*, 2017). O ciclo do C é intrinsecamente associado a uma complexa

interação e fluxos desse elemento entre compartimentos a exemplo da atmosfera, vegetação, solos e oceano (Janzen, 2004, Luo *et al.*, 2017). No solo, em particular, esse fluxo é regido por processos de adição de resíduos orgânicos, majoritariamente formados via fotossíntese, e perdas, decorrentes da decomposição heterotrófica (Janzen, 2004). Por esta razão, a matéria orgânica do solo (MOS) é, fundamentalmente, o principal componente a incorporar carbono oriundo da atmosfera ao compartimento terrestre com papel crucial no equilíbrio das condições climáticas, edáficas e bióticas (Luo *et al.*, 2017).

A matéria orgânica do solo é caracterizada por um conjunto heterogêneo de partículas e moléculas orgânicas em distintos estágios de decomposição, associações, estabilidade e tempo de residência no ambiente terrestre (Baldock *et al.*, 2004; Basile-Doelsch *et al.*, 2020). A MOS é formada, principalmente, por carbono orgânico do solo oriundo de resíduos vegetais, animais, biomassa e necromassa microbiana e compostos orgânicos resultantes da transformação desses materiais por fatores biológico, físico e químico (Lehmann e Kleber, 2015; Liang *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2021). Essa complexa matriz de origem biológica é bastante dinâmica, com distintos graus de suscetibilidade à transformação e, conceitualmente, agrupada em compartimentos e frações. A MOS é um dos mais relevantes indicadores de qualidade do solo, especialmente, em regiões tropicais, com solos altamente intemperizados (Latossolos), nos quais a fertilidade depende essencialmente da quantidade e qualidade da MOS.

A MOS também é importante no contexto das mudanças climáticas globais, já que os solos representam o maior reservatório de C na superfície da Terra, portanto, pode contribuir para a redução de emissões de GEE para a atmosfera. A MOS apresenta distintas funcionalidades que melhoram atributos relacionados às funções ecossistêmicas do solo e permeiam tanto aspectos ecológicos quanto produtivos (Signor *et al.*, 2018; Dias *et al.*, 2019; Dou *et al.*, 2020, Hoffland *et al.* 2020). A título de exemplo, destacam-se benefícios diretos como disponibilidade de nutrientes, aumento na CTC, agregação do solo, atividade biológica e, na capacidade de estocar carbono no solo (Sequeira; Alley, 2011; Ramos *et al.*, 2018; Machado *et al.*, 2019; Kopittke *et al.*, 2022; Carvalho *et al.*, 2023; Sousa *et al.*, 2024).

Em solos altamente intemperizados, onde predominam argilas de baixa atividade (1:1) e óxidos ferro e alumínio, práticas conservacionistas como a manutenção de resíduos vegetais e o não revolvimento do solo pela adoção do sistema plantio direto (SPD) contribuem para estabilização de agregados e a ação cimentante dos agentes biológicos (Six *et al.*, 2002a; Costa Júnior *et al.*, 2012, Figueiredo *et al.*, 2018). A composição e propriedades dos minerais influenciam na formação de agregados estáveis no solo. Minerais, a exemplo do basalto, apresentam maiores teores de ferro que interagem com minerais do solo e matéria orgânica do

solo e, por conseguinte, possuem a capacidade de promover a estabilidade de agregados (Mao *et al.*, 2020). Por outro lado,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , oriundos do intemperismo de materiais como o calcário, geram interação com a matéria orgânica do solo e a superfície dos minerais que promovem a formação e estabilidade dos agregados.

Essa capacidade de estabilização e proteção pode ser explicada por características como: (a) alta superfície reativa das argilas ( $< 2 \mu\text{m}$ ); (b) interações entre metal e compostos orgânicos, pontes de hidrogênio, forças de Van der Waals, pontes de cátion e troca entre ligantes (Georgiou *et al.*, 2022; Carvalho *et al.*, 2023). À medida que as partículas minerais ( $< 53 \mu\text{m}$ ) se associam com os componentes orgânicos ocorre, então, efeito de proteção física e diminui a exposição da MOS à oxidação microbológica o que, por conseguinte, aumenta o tempo de residência do C, ou seja, sua estabilidade no solo (Bayer *et al.*, 2004; Wienhold *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2021; Pinheiro *et al.*, 2021). Em contrapartida, fatores antrópicos como a mudança no uso da terra e perturbações físicas provocadas pelo uso intensivo do solo podem desestabilizar os agregados, desencadear exposição física e maiores taxas de oxidação da MOS ocasionando, dessa forma, depleção nos estoques de C para a atmosfera na forma de  $\text{CO}_2$  (Bordonal *et al.*, 2017, Carvalho *et al.*, 2023).

No que tange ao estudo da dinâmica da MOS, deve-se considerar fatores como qualidade, quantidade e a diversidade de compostos orgânicos aportados ao solo (Signor *et al.*, 2018; Carvalho *et al.*, 2023). A composição química do resíduo orgânico implica em variadas taxas de decomposição, que influenciam, por sua vez, na transformação e estabilidade do C no ecossistema terrestre (Hoffland *et al.*, 2020). A ciclagem das frações orgânicas é também influenciada pela localização da MOS no perfil do solo (Zeferino *et al.*, 2023). De acordo com estudos prévios, mudanças no uso da terra e o sistema de manejo adotado podem promover alterações na dinâmica da MOS que são observadas nas frações da MOS como também no C orgânico total (Lima *et al.*, 2016; Figueiredo *et al.*, 2018; Dias *et al.*, 2019; Phukubye *et al.*, 2022; Sousa *et al.*, 2024). Em solos altamente intemperizados, a exemplo do Cerrado, a MOS é a principal responsável pela troca de cátions (CTC) desses solos (Dias *et al.*, 2019; Sá *et al.*, 2022). Destaca-se que, pastagens, quando adequadamente manejadas, são eficazes em aumentar os estoques de C no solo a longo prazo e atuar como medidas mitigadoras de mudanças climáticas (Signor *et al.*, 2018; Phukubye *et al.*, 2022).



### 2.2.2 Fracionamento da matéria orgânica do solo

Diante da heterogeneidade da MOS, estágios de decomposição e interações com os minerais do solo, as técnicas de fracionamento são meios de analisar, de forma mais integrada, a dinâmica da MOS e o impacto da mudança de uso e dos manejos dos agrossistemas em cada compartimento. As frações da MOS podem ser isoladas e caracterizadas por diversos métodos de extração com base na associação e localização em relação às partículas minerais do solo – fracionamento físico – ou quanto às propriedades químicas a exemplo da solubilidade dos compostos orgânicos – fracionamento químico (Mendonça e Matos, 2017). Essas frações podem apresentar características mais estáveis ou lábeis e ativas que, por sua vez, influenciam na rotatividade ou estabilidade do C no solo (Bayer *et al.*, 2004). As frações da MOS são indicadores mais sensíveis para se avaliar alterações na MOS em função de práticas de manejo (Ramos *et al.*, 2020; Carvalho *et al.*, 2022; Sousa *et al.*, 2024) que alteram a quantidade, estabilização, tipos de compostos orgânicos constituintes dos resíduos, assim como as ligações que se estabelecem junto à matriz mineral do solo (Sequeira e Alley, 2011; Pulido-Moncada *et al.*, 2018).

O carbono orgânico particulado (COP) é um representante da fração lábil do carbono orgânico total do solo (COT), associado à fração areia ( $> 53 \mu\text{m}$ ). O COP é formado por um substrato orgânico parcialmente decomposto, facilmente biodegradado e fonte de energia e nutrientes para a microbiota do solo (Haynes, 2015; Sequeira; Alley, 2011; Wienhold *et al.*, 2013). A quantidade de COP formada está relacionada à quantidade de resíduos orgânicos aportados ao solo, sendo bastante sensível ao aporte e decomposição de resíduos vegetais no solo (Sousa *et al.*, 2024). Portanto, essa fração é considerada um indicador de mudanças na qualidade do solo e aplicada para avaliar a fração lábil da MOS, tendo em vista a sensibilidade que ela apresenta frente a alterações nas práticas de manejo (Six *et al.*, 2002b; Sequeira e Alley, 2011).

O carbono orgânico associado aos minerais (COAM) se refere à fração associada à matriz de minerais silte e argila ( $< 53 \mu\text{m}$ ), que por interações químicas fortes entre as superfícies, torna a MOS protegida da oxidação (Loss *et al.*, 2009; Locatelli *et al.*, 2022). Essas duas frações exercem papéis na dinâmica do C no solo, a particulada por ativamente contribuir para a atividade biológica do solo e na mineralização de elementos essenciais a nutrição das plantas, e a associada aos minerais por viabilizar a proteção, estabilidade e persistência do C orgânico no solo. Em relação as frações da MOS, foi identificado somente um trabalho que abordasse o efeito de mineral silicático nas frações físicas. Buss *et al.* (2023) observaram que a

aplicação de basalto foi capaz de promover um aumento da liberação de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  que, por sua vez, promoveram aumento na agregação e estabilização de frações lábeis como a particulada. Os mesmos autores também observaram um aumento de 22% na fração COAM, promovida pelo aumento dos sítios de sorção devido aos minerais secundários. Ressalta-se que não foi identificado, na literatura, artigo que tenha realizado o fracionamento físico da MOS para experimentos com biotita-xisto ou kamafigito. O presente trabalho busca, portanto, quantificar os teores de COP e COAM e avaliar o potencial dessas fontes para o aumento do COS.

As substâncias húmicas (SH's) referem-se a uma categoria de polímeros amorfos de natureza química complexa, coloração variando de amarelo a preto, peso molecular relativamente alto formados a partir da transformação química e biológica de resíduos orgânicos (humificação) (Stevenson, 1985; Dou *et al.*, 2020). O material humificado é considerado um compartimento estável que pode representar até 80% da matéria orgânica total de solos minerais com papel fundamental nos serviços ecossistêmicos (Stevenson, 1994). As frações da matéria orgânica humificada e particulada podem ser utilizadas como indicadores para avaliar a qualidade e efeitos de mudanças no uso do solo em prazo mais curto do que as mudanças nos estoques do COT (Silva *et al.*, 2020; Sousa *et al.*, 2024).

As SH's são compostas por três frações principais: humina, ácidos húmicos e ácidos fúlvicos. A separação das frações dos compostos húmicos é obtida por fracionamento químico, compreendendo sucessivas etapas de extração. Essas frações são definidas, operacionalmente, em termos de características de solubilidade em água, tendo em vista a formação de complexos solúveis e insolúveis que estão relacionados a fatores como grupamentos funcionais, peso molecular e polaridade (Mendonça e Matos, 2017). A humina é a fração residual, insolúvel em qualquer condição de pH que apresenta forte ligação à fase mineral do solo e está relacionada com a formação de agregados do solo e estabilidade do C no ecossistema terrestre. A fração denominada ácido húmico, por sua vez, também apresenta maior estabilidade. Ressalta-se que resíduos vegetais com maior teor de lignina em relação ao nitrogênio acarretam uma menor taxa de mineralização. Isso posto, tal característica é apontada como um potencial mecanismo para fixação de carbono, possivelmente impulsionando a formação das frações humina e ácidos húmicos, caracterizadas como mais estáveis (Figueiredo *et al.*, 2018). A fração denominada ácido fúlvico, solúvel em pH ácido ou básico apresenta menor peso molecular e grande quantidade de grupos funcionais que influencia, por seu turno, no aumento da CTC do solo (Matos e Mendonça, 2017).

O fracionamento químico pode ser uma ferramenta útil para comparar a dinâmica e estabilidade da MOS em diferentes sistemas de produção tais como: (a) monoculturas ou sistemas mais diversos, (b) diferentes níveis de intensidade de manejo do solo, (c) áreas nativas e agrossistemas manejados, entre outros (Figueiredo *et al.*, 2018). Em solos intemperizados, caracterizados por pH ácido e baixa fertilidade natural, a matéria humificada contribui significativamente com cargas negativas (CTC), tendo em vista a presença de substâncias húmicas com grupos funcionais (-COOH e -OH) que se dissociam em faixas de pH mais baixas e o menor ponto de carga zero (PCZ) (Ramos *et al.*, 2018). Nesse sentido, a quantificação das frações, lábeis ou estáveis, pode ser uma importante ferramenta para o monitoramento da qualidade e dos serviços ecossistêmicos da MOS, estimar o impacto de manejos agrícolas na dinâmica do carbono e sua influência no balanço de carbono, em prazo mais curto, do que COT e estoques de C (Locatelli *et al.*, 2022). Ressalta-se que não foi identificado, na literatura, nenhum artigo que tenha realizado o fracionamento químico da MOS em experimentos com minerais silicáticos. Verifica-se, portanto, uma lacuna de pesquisa a qual o presente trabalho busca esclarecer e contribuir.

### 2.3 BOTÂNICA E POTENCIAL PRODUTIVO DA *Urochloa brizantha*

No Brasil, dentre as atividades produtivas do agronegócio, as pastagens cultivadas constituem a principal classe de uso da terra (Santos *et al.*, 2022a). Presente em todos os biomas brasileiros, estima-se que ocupem, aproximadamente, 164 milhões de hectares (MapBiomas, 2023). Em regiões tropicais, a alimentação dos ruminantes é realizada predominantemente à base de gramíneas forrageiras (Santos Filho *et al.*, 2021). Sistemas de produção à pasto conferem competitividade à pecuária brasileira, dada a extensão territorial, condições climáticas favoráveis, elevado potencial produtivo e baixo custo de produção (Lisboa *et al.*, 2021).

O gênero *Urochloa* spp. (Syn. *Brachiaria* spp.), popularmente conhecido como braquiária, constitui-se em um grupo de plantas herbáceas, perenes, pertencentes à família *Poaceae*, subfamília *Panicoideae* e nativas da África Oriental e Central (Ferreira *et al.*, 2021; IPNI, 2024). O referido gênero compreende 110 espécies que, após gradativa introdução, tornou-se a forragem predominante cultivada em condições tropicais e subtropicais de clima quente como as encontradas na América do Sul, Austrália e leste Asiático (Salariato *et al.*, 2010).

De acordo com Beloni *et al.* (2018), *Urochloa* spp. reúne as espécies mais cultivadas para a formação de pastagens no Brasil. Das áreas cultivadas em regime de pastagem em território brasileiro, cerca de 85% estão concentradas em quatro espécies, a saber: *U. brizantha* (Hochst. ex A.Rich.) R.D.Webster; *U. decumbens* (Stapf.) R. Webster (syn. *Brachiaria decumbens* Stapf.), *U. humidicola* (Rendle) Morrone & Zuloaga (syn. *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweick) e *U. ruziziensis* (R. Germ. C. M. Evrard.) R. Webster (syn. *Brachiaria ruziziensis* Germ. & Evrard) (Pessoa-Filho *et al.*, 2017; Matias *et al.*, 2020; IPNI, 2024).

Trata-se de gênero reconhecido por atributos como rusticidade, palatabilidade, alto potencial produtivo de biomassa e sementes, adaptação a solos com baixa fertilidade, além de sistema radicular vigoroso, abundante e profundo (Baptistella *et al.*, 2020; Ferreira *et al.*, 2021; Kuwi *et al.*, 2018). Tais características conferem a essas forragens uma performance favorável em ecossistemas tropicais, em particular, quanto à capacidade de suportar estações de escassez hídrica (Fernandes *et al.*, 2023). Ademais, esse gênero possui notório potencial para explorar maiores volumes de solo, o que influencia na absorção de água e nutrientes com reflexo na produtividade (Baptistella *et al.*, 2020; Fernandes *et al.*, 2023). Soares *et al.* (2021), avaliando o desempenho de – insumos minerais naturais e de liberação lenta de fósforo e potássio – sob cultivo de *U. brizantha* cv. Marandu + *Stylosanthes* spp., observaram efeitos responsivos da cultura ao manejo, com reflexos na produção de matéria seca e potencial de extração de P e K do solo.

A *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás, cultivar desenvolvida pela Embrapa e lançada em 2013, é uma espécie forrageira adaptada a solos de média fertilidade e clima com estações secas bem definidas, condição prevalente na zona tropical brasileira (Valle *et al.*, 2013). De forma geral, a cultivar notabiliza-se por plasticidade fenotípica em condições de estresse hídrico, conservando, a despeito do fator abiótico, potencial de crescimento e satisfatória produção de biomassa (Rezende *et al.*, 2022; Fernandes *et al.*, 2023). A expressão de tolerância à desidratação por parte da cultivar envolve fatores morfológicos na epiderme. Lisboa *et al.* (2021) relataram maior espessura na epiderme adaxial na lâmina foliar da cultivar Paiaguás, com efeito a restringir a perda de água para o ambiente. Os achados corroboraram resultados de Beloni *et al.* (2018) que atestaram a tolerância ao estresse abiótico e produção da biomassa aérea em condições de baixa disponibilidade hídrica.

Desde o seu lançamento, a cultivar Paiaguás tem sido avaliada quanto ao seu potencial uso em condições de cultivo consorciado ou em sistemas de integração. Em ensaios a campo, verificou-se que as distintas funcionalidades das espécies aumentam a produtividade das forragens, reduzem a sazonalidade da produção e promovem a atividade enzimática no solo

(Montagner *et al.*, 2018; Fernandes *et al.*, 2023; Franco *et al.*, 2020). Ressalta-se que, o cultivo da forragem consorciada com leguminosas é capaz de elevar a eficiência de uso dos nutrientes, principalmente, nitrogênio, também fósforo e potássio (Rezende *et al.*, 2023).

Embora a cultivar Paiaguás seja adaptada a condições de média fertilidade, evidências sugerem que a espécie pode se beneficiar da adoção de manejos voltados à nutrição. Germano *et al.* (2018) e Domingues *et al.* (2018) observaram que a fertilização com nitrogênio em Latossolo distrófico é capaz de gerar reposta da forragem quanto à altura, número de perfilhos, matéria seca das partes aéreas e raiz. Semelhantemente, Bonfim-Silva *et al.* (2019), investigando a combinação de efeitos da aplicação de cinza vegetal como fonte de macronutrientes - potássio, cálcio e magnésio - sob diferentes tensões de água no solo, verificou melhor desempenho da forragem frente ao estresse hídrico, aumento no número de folhas e incrementos de massa seca da parte aérea.

De forma geral, verifica-se, na literatura, benefícios à sustentabilidade do ecossistema de produção, por meio de melhorias nos atributos físicos e químicos do solo, mediante o cultivo da cultivar Paiaguás. Segundo Paiva Filho *et al.* (2016), o robusto sistema radicular da forrageira é capaz de romper camadas compactadas do solo que resultam na promoção da permeabilidade e estabilidade de agregados. Os achados são consistentes com o estudo de Policarpo *et al.* (2023) que, ao comparar onze cultivares de forragem, observaram o desempenho superior das raízes da cultivar Paiaguás para elevar teor de umidade no perfil do solo, beneficiando, assim, todo o sistema solo-planta. De forma mais ampla, ressalta-se a importância da biomassa da forragem, aérea e radicular, para a agregação e qualidade do solo. A matéria seca formada influencia, contribuindo na cobertura de solo, atividade biológica da fauna e microbiota, que, por seu turno, auxiliam na formação da matéria orgânica do solo que melhora na fertilidade pela ciclagem de nutrientes (Stumpf *et al.*, 2015). Isso posto, ressalta-se o potencial da *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás e suas possíveis inter-relações com demais fatores agronômicos para aprimorar a conservação e sustentabilidade dos ecossistemas de produção agropecuária.

### 3. HIPÓTESES E OBJETIVOS

#### 3.1 HIPÓTESES

1. A aplicação dos agrominerais silicáticos biotita xisto, basalto ou kama fugito ao solo, sob ação da rizosfera de *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás, após sete anos, em solo tropical, promove a estabilidade de agregados.
2. O uso dos agrominerais silicáticos biotita xisto, basalto ou kama fugito no solo, sob o cultivo de *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás, promove o aumento do estoque de carbono orgânico e das frações estáveis e lábeis da matéria orgânica em superfície e profundidade em solo tropical.
3. A incorporação de agrominerais silicáticos ao solo proporciona melhorias nas propriedades químicas, a exemplo do aumento nos teores de macro e micronutrientes, pH, capacidade de troca catiônica, soma de bases e saturação por bases.

#### 3.2 OBJETIVOS

##### 3.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito de agrominerais silicáticos, nos estoques de carbono nas frações da matéria orgânica do solo, distribuição de agregados e fertilidade do solo sob o cultivo de *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás.

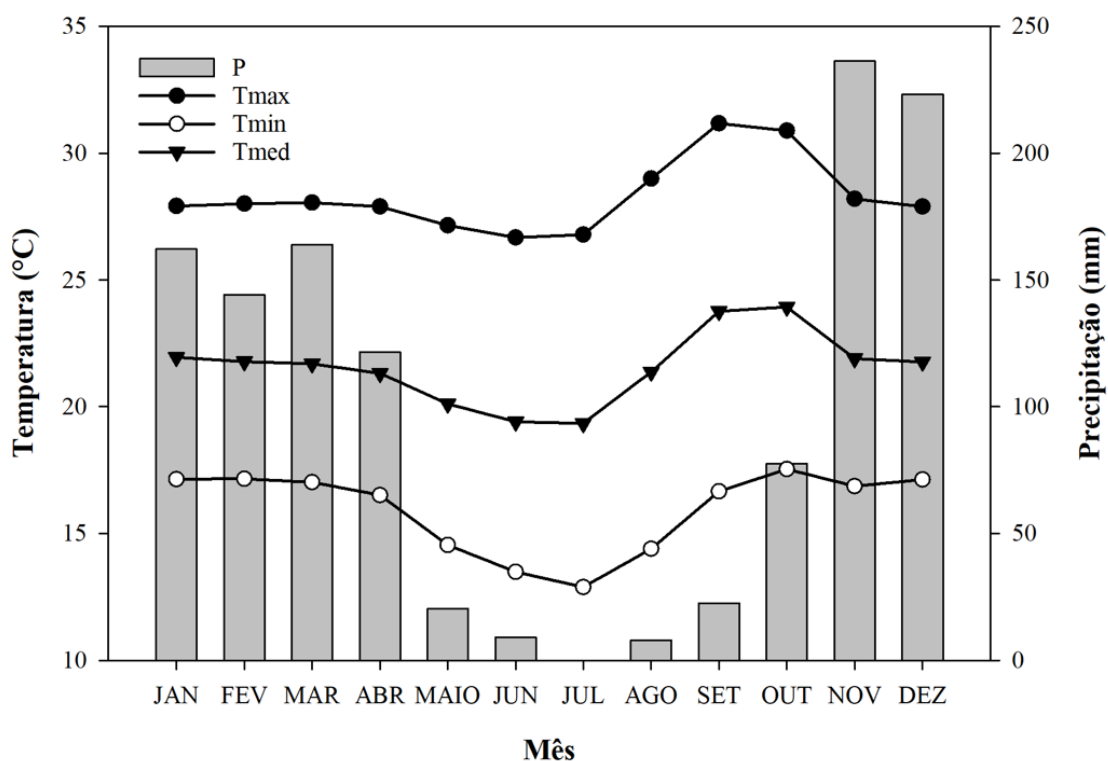
##### 3.2.2 Objetivo Específicos

- i. Avaliar o efeito dos agrominerais silicáticos biotita xisto, kama fugito e basalto na estabilidade de agregados ao nível de classes (macro, meso e microagregados).
- ii. Quantificar os teores de carbono orgânico nas frações química e física da matéria orgânica do solo e analisar as relações entre elas.
- iii. Estimar o estoque de carbono no solo após sete anos da aplicação de diferentes fontes de agrominerais silicáticos sob pastagem.
- iv. Verificar o efeito de agrominerais silicáticos nos parâmetros de fertilidade do solo a exemplo de teores de macro e micronutrientes, pH, capacidade de troca catiônica, soma de bases e saturação por bases.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido na área experimental da Embrapa Cerrados, 15° 36' 28" S e 47° 44' 54" W, a 1.171 m de altitude, em Planaltina – DF. O clima corresponde ao tipo tropical de savana (Aw), conforme a classificação de Köppen-Geiger (Alvares *et al.*, 2013; Beck *et al.*, 2018). Predomina na região, a distribuição sazonal da precipitação, com período quente e chuvoso, de outubro a abril, seguido de estação seca, entre os meses de maio e setembro. Com série histórica para estação experimental da Embrapa Cerrados, referente aos dados de 2013 a 2023, as médias anuais de precipitação pluviométrica e temperatura foram, respectivamente, de 982,25 mm e 21,62° C, com médias, mínima de 16,02°C e máxima 28,56°C (Figura 1) (Embrapa, 2023).



**Figura 1** Variação da média mensal de precipitação e temperatura na estação experimental Embrapa Cerrados, Planaltina, Distrito Federal, entre os anos de 2013 e 2023.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de textura argilosa - LVAd (Santos *et al.*, 2018, p. 199). As características químicas na implantação do experimento, na camada 0-20 cm, estão apresentada na tabela 1.

**Tabela 1.** Caracterização química inicial do solo da área experimental na camada de 0-20 cm.

pH H <sub>2</sub> O	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H + Al	P <sub>Meh-1</sub>	MO	SB	CTC efetiva	CTC total	V	m
		----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				mg dm <sup>-3</sup>	%		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>		%	%
5,63	0,09	2,06	0,833	0,01	4,101	0,23	2,87	2,985	2,995	7,086	42,131	0,33

pH em água; K<sup>+</sup> = potássio trocável; Ca<sup>2+</sup> = cálcio trocável; Mg<sup>2+</sup> = magnésio trocável; Al<sup>3+</sup> = alumínio trocável; H+Al = acidez potencial; P<sub>Meh-1</sub> = fósforo extraído por Mehlich-1; MO = matéria orgânica do solo; SB = soma de bases trocáveis; CTC efetiva = capacidade de troca de cátions efetiva; CTC total = capacidade de troca de cátions a pH 7, V = saturação por bases e m = saturação por alumínio.

## 4.2 IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi implantado em setembro de 2015, com delineamento experimental de blocos ao acaso (DBC), com quatorze tratamentos e três repetições, dos quais, no presente estudo, foram escolhidos cinco tratamentos, perfazendo assim, quinze unidades/parcelas experimentais analisadas, cada uma com 9 m<sup>2</sup> (3m x 3m) (Anexo A). Os seguintes tratamentos foram avaliados: 1) 40 t ha<sup>-1</sup> de basalto; 2) 151 t ha<sup>-1</sup> de biotita xisto; 3) 40 t ha<sup>-1</sup> de kamafigito; 4) 333,33 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio (KCl) e 5) controle, sem a adição de agromineral silicático ou fertilizante. A escolha dos tratamentos nas maiores doses foi pautada na hipótese da geração de cargas permanentes que contribuem para elevar a CTC do solo a 1 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>. A composição química dos principais elementos e mineralogia das rochas supracitadas estão apresentadas nas tabelas 2 e 3.



**Tabela 2.** Composição química dos principais elementos das rochas basalto, biotita xisto e kama fugito

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	LOI <sup>2</sup>
Tratamento <sup>1</sup>	-----%-----										
<b>Basalto</b>	49.5	11.6	15.6	9.8	5.6	3.2	0.4	2.2	1.2	0.2	1.1
<b>Biotita-Xisto</b>	62.6	16.8	7.8	1.44	3.2	0.86	0.2	1.93	3.19	0.12	2.17
<b>Kamafugito</b>	37.6	1.8	10.6	15.1	16.9	7.8	0.93	2.5	2.65	0.17	3.6

<sup>1</sup> Análises realizadas pelo laboratório SGS Geosol laboratory (<https://www.sgsgeosol.com.br>) e CRTI laboratório (<https://crti.ufg.br>); <sup>2</sup>LOI – perda ignição.

**Tabela 3.** Composição mineralógica das rochas basalto, biotita xisto e kama fugito.

Tratamento <sup>1</sup>	MBC <sup>1</sup>	Cc <sup>2</sup>	Px <sup>3</sup>	Pl <sup>4</sup>	FK <sup>5</sup>	Bt <sup>6</sup>	Fl <sup>7</sup>	Mu <sup>8</sup>	Ct <sup>9</sup>	Ap <sup>10</sup>	Am <sup>11</sup>	St <sup>12</sup>	Vm <sup>13</sup>	Fp <sup>14</sup>	Qz <sup>15</sup>	Im <sup>16</sup>	Mt <sup>17</sup>	Hm <sup>18</sup>	Ep <sup>19</sup>	Ze <sup>20</sup>	Ol <sup>21</sup>	Me <sup>22</sup>	Tb <sup>23</sup>	Total
<b>Basalto</b>	11.1	0	35	35	5	0	0	0	0	0.9	0	2.5	0	0	2.1	6.8	1.1	0.6	0	0	0	0	0	100.1
<b>Biotita-Xisto</b>	0	0	1.7	22.1	0	11.2	0	17.9	11.3	0	0	0	0	0	35.7	0	0	0	0	0	0	0	0	99.9
<b>Kamafugito</b>	13.9	1.77	1.77	0	1.72	0	18.1	0	2.03	2.7	0	0	1.15	8.57	3.0	0	2.9	1.07	2.8	2.16	22.1	2.2	3.39	91.3*

<sup>1</sup> Análises mineralógicas realizadas pelo CRTI (<https://crti.ufg.br>) e Laboratório da Universidade Federal do Pará. Os materiais analisados incluíram minerais de baixa cristalinidade (**MBC**<sup>1</sup>), calcite (**Cc**<sup>2</sup>) CaCO<sub>3</sub>, pyroxene (**Px**<sup>3</sup>) (Ca, Na)(Mg, Fe, Al, Ti)(Si, Al)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, plagioclase (**Pl**<sup>4</sup>) (Na, Ca)(Si, Al)<sub>4</sub>O<sub>8</sub>, potassium feldspar (**FK**<sup>5</sup>) KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, biotite (**Bt**<sup>6</sup>) K(Mg, Fe<sup>2+</sup>)<sub>3</sub>[AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH, F)<sub>2</sub>], phlogopite (**Fl**<sup>7</sup>) KMgSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH, F)<sub>2</sub>, muscovite (**Mu**<sup>8</sup>) KAl<sub>2</sub>(Si<sub>3</sub>Al)O<sub>10</sub>(OH, F)<sub>2</sub>, chlorite (**Ct**<sup>9</sup>) (Mg, Fe<sup>2+</sup>)<sub>5</sub>Al(Si<sub>3</sub>Al)O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>, apatite (**Ap**<sup>10</sup>) Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH, F, Cl), amphibole (**Am**<sup>11</sup>) A<sub>0-1</sub>B<sub>2</sub>C<sub>5</sub>T<sub>8</sub>O<sub>22</sub> (OH, F)<sub>2</sub> (where: A = Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>; B = Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>; Mn<sup>2+</sup>, Li<sup>+</sup>; C = Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>; Mn<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cr<sup>3+</sup>, Li<sup>+</sup>, or Ti<sup>4+</sup>; T = Si, Al), smectite (**St**<sup>12</sup>) (Na, Ca)<sub>0.3</sub>(Al, Mg)<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>•n(H<sub>2</sub>O), vermiculite (**Vm**<sup>13</sup>) (Mg, Fe<sup>2+</sup>, Al)<sub>3</sub>(Al, Si)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>•4(H<sub>2</sub>O), feldspathoid (**Fp**<sup>14</sup>) (Na, K)AlSiO<sub>4</sub>, quartz (**Qz**<sup>15</sup>) SiO<sub>2</sub>, ilmenite (**Im**<sup>16</sup>) Fe<sup>2+</sup>TiO<sub>3</sub>, magnetite (**Mt**<sup>17</sup>) Fe<sup>2+</sup>Fe<sup>3+</sup><sub>2</sub>O<sub>4</sub>, hematite (**Hm**<sup>18</sup>) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, epidote (**Ep**<sup>19</sup>) (Ca, Ce, La, Y, Th, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Mn<sup>3+</sup>)<sub>2</sub>(Al, Fe<sup>3+</sup>, Mn<sup>3+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Ti, Cr)<sub>3</sub>O(SiO<sub>4</sub>)(Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)(OH), zeolite chabazite (**Ze**<sup>20</sup>) (Ca, K<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>)<sub>2</sub>[Al<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>12</sub>]<sub>2</sub>•12H<sub>2</sub>O, olivine (**Ol**<sup>21</sup>) (Mg, Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, melilite (**Me**<sup>22</sup>) (Ca, Na)<sub>2</sub>(Mg, Al)(Si, Al)<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, and tobermorite (**Tb**<sup>23</sup>) Ca<sub>5</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>16</sub>(OH)<sub>2</sub>•4H<sub>2</sub>O. \*8.7% como traço de minerais.

A primeira atividade operacional, realizada em outubro de 2015, consistiu na correção da acidez do solo, com aplicação, a lanço, de 500 kg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico e 1 t ha<sup>-1</sup> de gesso. Logo após, ambos foram incorporados ao solo à profundidade de 20 cm por grade niveladora. Em dezembro do mesmo ano realizou-se a adubação de plantio. Foram utilizadas, para tanto, as doses de 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, tendo como fonte o termofosfato magnésiano, e 100 kg ha<sup>-1</sup> de FTE-BR12 (3,9% de enxofre; 1,8% de boro; 2,0% de manganês e 9,0% de zinco) como fonte de micronutrientes. Ambos foram aplicados uniformemente, a lanço, e incorporados ao solo à profundidade de 20 cm por grade niveladora. Posteriormente, as parcelas receberam seus respectivos tratamentos que foram, para este fim, incorporados com motocultivador com enxada rotativa, na camada de 10 cm.

A semeadura da *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás foi realizada em 25 de janeiro de 2016, a lanço, com a recomendação de 3 kg ha<sup>-1</sup> de semente pura geminável, permanecendo sem revolvimento do solo e pastejo ao longo do experimento, de 2016 a 2023. O nitrogênio foi aplicado em cobertura 30 dias após a semeadura (DAS), na forma de sulfato de amônio (20% N), na dose 50 kg ha<sup>-1</sup>. Para esse mesmo período foram realizados cortes da biomassa uma vez ao ano, época chuvosa. Após o corte, a biomassa foi removida das parcelas com o propósito de possibilitar uma melhor rebrota e simular o pastejo. Em todo o restante do período, o material senescente era mantido nas respectivas unidades experimentais.

#### 4.3 AMOSTRAGEM DE SOLO

As amostras de solo foram coletadas em outubro de 2023, sete anos após a implantação do experimento. As amostragens foram executadas nas profundidades de 0-10; 10-20; 20-30; 30-40; e 40-60 cm, com auxílio de trado do tipo holandês, sendo 5 sub amostras para cada amostra composta. Após a redução da umidade do solo, procedeu-se ao destorroamento e peneiramento em malha de 2,00 mm obtendo-se, assim, a terra fina seca ao ar (TFSA). O solo coletado na referida amostragem foi designado para os procedimentos analíticos laboratoriais referentes ao carbono orgânico total, fracionamentos físico e químico da matéria orgânica e fertilidade do solo, sendo, esses dois últimos, apenas nas três primeiras camadas (0-10; 10-20; 20-30).

Foram também coletadas amostras indeformadas com anéis volumétricos de 100 cm<sup>3</sup> para densidade do solo (Figura 2). De forma semelhante, foram coletadas amostras

indeformadas com trado calador para as análises de distribuição de agregados estáveis ao peneiramento úmido (Figura 3).



**Figura 2.** Amostragem de solo em anel volumétrico de 100 cm<sup>3</sup>



**Figura 3.** Amostragem de solo com trado calador para camada de 10 cm (A) e 20 cm (B).

## 4.4 ANÁLISES LABORATORIAIS

### 4.4.1 Determinação da Densidade do Solo

A primeira etapa para determinação da densidade do solo consistiu na determinação do volume dos anéis. Para esse fim, utilizou-se um paquímetro para mensurar o diâmetro interno dos anéis. Foram realizadas três aferições, calculando a média entre elas, para determinação do volume (Equação 1).

$$V_t = \pi \cdot \left( \frac{d^2}{4} \right) \times h \quad (1)$$

Em que:

$V_t$ : Volume interno do anel, em  $\text{cm}^3$

$d$ : Diâmetro interno do anel, em cm

$h$ : Altura do anel, em cm

A densidade do solo ( $\rho_s$ ) em base seca (equação 2), foi determinada em cada camada a partir de amostras obtidas com anéis volumétricos. Para esse fim, foi determinada a massa total da amostra úmida coletada ( $m_{su}$ ), cujo volume ( $V$ ) era conhecido para cada anel. A massa total de solo úmido foi pesada em balança, modelo Mettler PM 4000, com acurácia de 0,01 g. Os anéis contendo as amostras úmidas foram pesados e os dados registrados. Logo após, o material foi armazenado em estufa para secagem a  $105^\circ\text{C}$ , por 24 horas, até atingir constância de massa. Após o período determinado, o conjunto foi novamente pesado para se determinar a massa seca da amostra  $m_{ss}$ . Por fim, a densidade do solo ( $\rho_s$ ) foi calculada pela equação 2.

$$\rho_s = \frac{m_{ss}}{V} \quad (2)$$

Em que:

$\rho_s$ : Densidade do solo, em  $\text{g cm}^{-3}$ .

$m_{ss}$ : Massa da amostra de solo seco a  $105^\circ\text{C}$  até atingir constância de massa, em g.

$V$ : Volume anel, em  $\text{cm}^3$ .

#### 4.4.2 Distribuição de Agregados Estáveis ao Peneiramento Úmido

A avaliação de agregação do solo se deu pela determinação das proporções entre macro, meso e microagregados estáveis quando submetidos ao processo de peneiramento úmido. Os procedimentos adotados em laboratório foram adaptações dos protocolos propostos por Yoder (1936), Kemper e Rosenau (1986). Agrupou-se, para tanto, os agregados em classes, com base nas seguintes dimensões:

Ultra-macroagregados: diâmetro entre 8,00 e 4,00 mm;

Macroagregados: diâmetro entre 4,00 e 2,00 mm;  
 Mesoagregados: diâmetro entre 2,00 e 0,25 mm;  
 Microagregados: diâmetro > 0,25 mm.

Para tanto, foram utilizadas as amostras de solo coletadas com trado calador. Elas foram mantidas com a umidade de coleta em sacos plásticos vedados e com a menor perturbação mecânica possível, de forma que a estabilidade física do material fosse preservada. Em laboratório, o preparo das amostras consistiu no peneiramento do solo, a seco, em malha de 8 mm. Os agregados superiores a 8 mm foram cuidadosamente fracionados, de forma que todo o conteúdo de solo transpassasse pela malha da peneira. As amostras que apresentaram cascalhos, fragmentos vegetais ou partículas visivelmente grandes foram excluídas e, posteriormente, pesadas em balança de precisão Mettler PM 4000 com precisão de pesagem de 0,01 g.

Na sequência, as amostras foram cautelosamente homogeneizadas, a fim de preservar os agregados, retirando-se nova alíquota de, aproximadamente, 10 g de solo úmido para nova determinação do teor de umidade e correção do peso seco das amostras que seriam submetidas ao processo de peneiramento úmido (Equações 2 e 3).

Para realização do fracionamento dos agregados ao peneiramento em meio úmido, foi adotada uma adaptação aos métodos proposto por Embrapa (Salton *et al.*, 2017) e USDA (2014). Retirou-se, de cada amostra original, subamostras com massa entre 50 e 52 gramas que foram distribuídas, homogeneamente, à superfície do conjunto de peneiras de malhas: 4 mm; 2 mm e 0,25 mm e conforme as classes supracitadas. A fração < 0,25 mm, os microagregados, foram determinados com base na diferença na massa de solo. As amostras foram submetidas ao peneiramento, em meio úmido, no agitador de oscilação vertical proposto por Yoder (1936), durante 5 minutos. O conteúdo retido a cada peneira foi transferido para recipientes metálicos, de massa conhecida, e submetido à secagem a 105°C, por 24 h, momento em que o solo atingiu constância de massa. Após a secagem, os conjuntos foram pesados e determinou-se, conforme proposto por Kemper e Rosenau, (1986), o Diâmetro Médio Ponderado (DMP) e Diâmetro Médio Geométrico (DMG), equações expressas por (3) e (4), respectivamente.

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i w_i) \quad (3)$$

Em que:

DMP: Diâmetro Médio Ponderado, expresso em mm.

$x_i$ : Proporção (%) de agregados retidos à peneira, expressa na forma decimal.

$w_i$ : Diâmetro médio de determinada classe de agregados, expresso em mm.

$$DMG = 10^{\left(\frac{\sum n \log d}{\sum n}\right)} \quad (4)$$

Em que:

DMG: Diâmetro Médio Geométrico, expresso em mm.

$n$ : Proporção (%) de agregados retidos à peneira, expressa na forma decimal.

$d$ : Diâmetro médio de determinada classe de agregados, expresso em mm.

#### 4.4.3 Teor e estoque de Carbono Orgânico Total do Solo (CHNS/O)

A quantificação dos teores de COT do solo foi realizada considerando, individualmente, todas as camadas amostradas, conforme descrito na sessão 1.2. A partir da amostra base (TFSA), retirou-se uma alíquota de 5 mL de solo que foi macerada com pestilo e almofariz de ágata. Em seguida, a amostra seca foi peneirada de forma que todo o conteúdo de solo transpassasse a malha de 150  $\mu$ m. Desse conteúdo, retirou-se subamostras com massa variando entre 39 e 41 mg, que foram depositadas sobre folhas de estanho, de 35 x 35 mm e, na sequência, encapsuladas para serem acondicionadas no carretel. Adotou-se o mesmo procedimento para as amostras padrão, substituindo-se o solo por sulfanilamida ( $C_6H_8O_2N_2S$ ). A fim de determinar o teor de C pelo método da combustão seca, as subamostras foram oxidadas, a 900°C, pelo analisador elementar orgânico CHNS/O, modelo Vario Macro Cub, da fabricante Elementar. A determinação do estoque de carbono (EC) foi realizada, individualmente, por camada, conforme a equação (5) proposta por Fernandes e Fernandes (2008).

$$EC(Mg\ ha^{-1}) = (C \times \rho_s \times Z) / 10 \quad (5)$$

Em que:

C: Teor de carbono para a camada, em g  $kg^{-1}$ .

$\rho_s$ : Densidade do solo, em g  $cm^{-3}$ .

Z: Espessura da camada amostrada, em cm.

#### 4.4.4 Fracionamento da matéria orgânica do solo

##### 4.4.4.1 Fracionamento físico granulométrico

Realizou-se o fracionamento físico da MOS com base no método proposto por Cambardella e Elliot (1992), com adaptações, quanto à massa de solo e volume da solução utilizados por amostra (Nascimento *et al.*, 2009). As quantificações dos teores de carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COAM) foram determinadas em amostras das camadas 0-10; 10-20 e 20-30 cm. A partir das amostras de TFSA (< 2 mm), vinte gramas do solo foram extraídos e depositados em recipientes de vidro, aos quais, em seguida, foram adicionados, individualmente, 80 mL da solução dispersante de hexametáfosfato de sódio ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub>, na concentração de 5 g L<sup>-1</sup>. Após vedado, os recipientes foram submetidos a agitação por 15 horas, a 150 rpm, a fim de realizar a separação das frações particulada e mineral. Transcorrido o tempo, a totalidade da solução com solo disperso foi vertida em peneira de 53 µm. Permaneceram retidas à malha a fração areia, ao qual o carbono orgânico particulado está associado. A fração foi, então, lavada com auxílio de jatos de água deionizada e cuidadosamente transferidos para beakers. Os recipientes foram acomodados em estufa com circulação de ar à 50° C até atingir constância de massa. Logo após, a fração seca teve sua massa quantificada. Subsequentemente, a fração obtida foi macerada com pestilo em almofariz de ágata até que todo material homogeneizado transpassasse a peneira de malha de 150 µm. A determinação do carbono, presente na fração particulada (COP), foi realizada pelo método da combustão seca no analisador elementar CHNS-O, modelo Vario Macro Cub, da fabricante Elementar. As subamostras submetidas ao analisador foram obtidas seguindo o protocolo supracitado na sessão 1.3.3. Determinou-se o COAM por diferença do COT e COP, conforme expresso na equação (6) (Mendonça; Matos, 2017).

$$COAM = COT - COP \quad (6)$$

Em que:

COAM: Carbono orgânico associado aos minerais.

COT: Carbono orgânico total.

COP: Carbono orgânico particulado.

#### 4.4.4.2 Fracionamento químico das substâncias húmicas

Realizou-se o fracionamento químico da MOS com base nas características de solubilidade, em meios álcali e ácido (Swift, 1996). A extração do carbono orgânico presente nas frações das substâncias húmicas, a saber, ácido húmico (AH), ácido fúlvico (AF) e humina (HUM), foi determinada pelo método de Swift (1996), descrito e adaptado por Benites *et al.* (2017). Analisou-se, em triplicata, as amostras referentes às camadas 0-10; 10-20 e 20-30 cm. Para tal fim, aproximadamente 1 (um) g de TFSA (< 2 mm) e 20 mL de solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 0,1 mol L<sup>-1</sup> foram agitados em tubo para centrífuga de 50 mL, durante quatro horas, a 80 rpm. Após doze horas de repouso, a suspensão foi centrifugada por trinta minutos, a 3400 rpm. O sobrenadante, extrato alcalino contendo as frações de AH e AF, foi transferido para um recipiente plástico e reservado. O precipitado, retido ao tubo, foi novamente submetido à agitação em 20 mL de solução NaOH a 0,1 mol L<sup>-1</sup>, durante duas horas e trinta minutos, a 80 rpm. Decorrido o tempo, a solução foi centrifugada por trinta minutos, a 3400 rpm. O sobrenadante obtido foi novamente vertido ao recipiente plástico contendo extrato alcalino (AH + AF) previamente reservado, totalizando, o volume de 40 mL a pH 13.

A fração residual, insolúvel, formado nessa etapa consiste na fração humina (HUM) que, por seu turno, foi mantido em estufa com circulação de ar à 50° C até completa secagem e reservado para etapa de determinação. O pH do extrato alcalino foi ajustado para  $1,4 \pm 0,1$  com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado para promover a separação das frações AH e AF. Logo após, a solução foi transferida para o tubo para centrífuga seguida de decantação por 15 horas. Transcorrido o período, os tubos foram levados a centrifugação durante 20 minutos a 3400 rpm. O sobrenadante, ácido fúlvico, fração solúvel independentemente do valor de pH, foi transferida para outro tubo para centrífuga e teve seu volume aferido a 50 mL com água destilada. A fração ácido húmico, resíduo coagulado e insolúvel em meio fortemente ácido, foram adicionados 20 mL de solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 0,1 mol L<sup>-1</sup> e o volume aferido para 50 mL com água destilada.

A determinação dos teores de carbono orgânico nas substâncias húmicas foi realizada com base no protocolo proposto por Yeomans e Bremner, 1988, e adaptado por Benites *et al.* (2017). De acordo com o método, o carbono é oxidado, por via úmida, a partir da digestão em solução de dicromato de potássio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) em meio ácido. A oxidação e, posterior, quantificação do carbono na fração humina (C-HUM) foi realizada



a partir do precipitado sólido, ao qual foram adicionados 5 mL da solução de dicromato de potássio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ )  $0,1667 \text{ mol L}^{-1}$ , 5 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado e aquecidos em bloco digestor a  $140^\circ\text{C}$ , durante 30 minutos. Após atingir temperatura ambiente, o conteúdo foi transferido para frascos Erlemeyer e adicionados 80 mL de água deionizada, seguidos de três gotas de solução indicadora ferroin. Procedeu-se a titulação com solução de sulfato ferroso amoniacal  $[\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$  a  $0,25 \text{ mol L}^{-1}$  até atingir o ponto de viragem.

As determinações do carbono nas duas outras frações (C-FAF e C-FAH) foram efetuadas com base em alíquotas de 5 mL retiradas de cada extrato aquoso, individualmente. A cada um foram adicionados 5 mL da solução de dicromato de potássio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) a  $0,042 \text{ mol L}^{-1}$ , 10 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado e submetidos a aquecimento em bloco digestor durante 30 minutos, a  $140^\circ\text{C}$ . Posteriormente, a cada amostra foram adicionadas 80 mL de água deionizada, juntamente com três gotas de solução indicadora ferroin. Realizou-se a titulometria com solução de sulfato ferroso amoniacal  $[\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$  a  $0,03 \text{ mol L}^{-1}$  até o ponto de viragem.

Ressalta-se que foram produzidos, para cada ciclo de determinação, quatro controles, denominados brancos. Nesse caso, o tubo digestor recebeu os reagentes, excetuando-se do ensaio a alíquota de AH, AF ou HUM extraídas do solo. Dois controles foram submetidos ao aquecimento em bloco digestor e os outros dois mantidos em temperatura ambiente, sendo esses últimos utilizados para quantificar o teor de dicromato perdido ao realizar o aquecimento (Matos e Mendonça, 2017). As quantificações de carbono orgânico em cada fração foram obtidas conforme Benites, Madari e Machado (2003).

#### 4.4.5 Análises dos atributos químicos do solo

As análises químicas laboratoriais referentes a fertilidade foram realizadas a partir das amostras compostas nas profundidades 0-10, com base no Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes (Silva *et al.*, 2017). Primeiramente, foi realizada a análise de pH em água, na proporção 1:2,5 e em  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ . Cálcio, magnésio e alumínio foram extraídos através da solução de KCl  $1 \text{ mol L}^{-1}$ . Fósforo, potássio e micronutrientes, por sua vez, quantificados a partir da extração com solução Mehlich-1 ( $\text{HCl}$   $0,05 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ ). A acidez potencial foi obtida a partir da extração pela solução de acetato de cálcio a  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  em pH 7,0. O teor de matéria orgânica foi estimado utilizando solução de dicromato de potássio como agente oxidante.

A partir dos resultados das análises supracitadas foram estimados os parâmetros capacidade de troca catiônica (CTC) total e efetiva, soma de bases e saturação por bases.

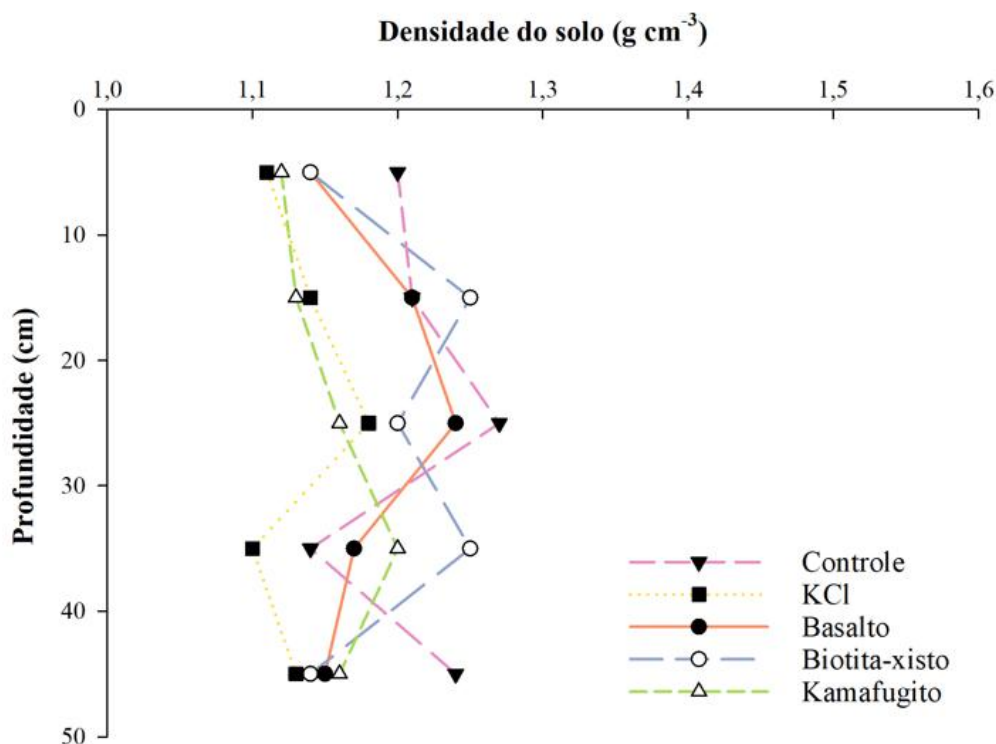
## **5. ANÁLISE ESTATÍSTICA**

Os resultados foram avaliados quanto aos pressupostos de normalidade e homoscedasticidade dos resíduos pelos testes de Shapiro-Wilk e O'Neill-Mathews ( $p < 0,05$ ), respectivamente. Quando atendidos os requisitos, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para testar a significância ( $p < 0,05$ ) dos tratamentos quanto aos atributos avaliados. Aos parâmetros com significância, aplicou-se o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) para comparação das médias entre os tratamentos. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R 4.3.2.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 DENSIDADE DO SOLO

A densidade do solo na camada de 0-60 cm variou de 1,13 a 1,21 g cm<sup>-3</sup>, sem diferença significativa entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ) (Figura 4). Os valores de  $\rho_s$  do presente estudo estão em consonância com pesquisas anteriores conduzidas tanto em Latossolos quanto sob cultivo de pastagem, evidenciando consistência nos resultados observados em diferentes contextos de manejo. Para Latossolo, sob sistema de plantio direto, a densidade média foi de 1,07, 1,08 e 1,07 g cm<sup>-3</sup> nas camadas de 0-10, 0-30 e 0-60 cm, respectivamente (Ferreira *et al.*, 2016). De forma semelhante, Carvalho *et al.* (2010) relataram densidade variando de 0,99 a 1,09 g cm<sup>-3</sup> na camada de 0-30 cm de latossolo cultivado com pastagem. Em pastagens sobre Latossolos Vermelho-Amarelos, foram verificadas variações médias de 1,01, 1,07 e 1,35 g cm<sup>-3</sup> (Ralisch *et al.*, 2008; Wendling *et al.*, 2012; Silveira *et al.*, 2023). Portanto, os valores observados no estudo corroboram aqueles relatados em Latossolos sob pastagens.



**Figura 4.** Densidade do solo nos diferentes tratamentos cultivados com *Urochloa brizantha* cv. Paiaguás, por sete anos, nas camadas 0-60 cm. Os tratamentos não apresentaram diferença significativa pelo teste F ( $p > 0,05$ )

## 6.2 GRANULOMETRIA

De modo geral, os teores de silte e argila não foram alterados pela aplicação dos agrominerais silicáticos (Tabela 4). Apenas os teores de areia foram afetados pela aplicação do basalto, biotita-xisto e KCl ( $p < 0,05$ ). O solo sob aplicação de kama fugito teve o menor teor de areia ( $348,42 \text{ g kg}^{-1}$ ). O kama fugito é uma rocha ultramáfica que apresenta um teor de 22,1% de olivina (tabela 3), mineral que tende a sofrer biointemperismo rapidamente e pode ter contribuído para a formação de frações menores que  $2 \mu\text{m}$ . No basalto, por sua vez, predominam piroxênios e plagioclásios (Krahl *et al.*, 2020), ambos representando 35% (tabela 3), que podem ter sofrido dissolução e igualmente formado argilas no solo.

**Tabela 4.** Teores médios de areia, silte e argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ) nos tratamentos no perfil 0-30 cm em Latossolo Vermelho-Amarelo.

Tratamento	Areia	Silte	Argila	Classe Textural
	----- $\text{g kg}^{-1}$ -----			
<b>Controle</b>	393.56 a	160.56 a	445.88 a	Argiloso
<b>KCl</b>	375.80 ab	161.92 a	462.28 a	Argiloso
<b>Basalto</b>	382.83 a	139.06 a	478.11 a	Argiloso
<b>Biotita-xisto</b>	380.44 ab	148.96 a	470.60 a	Argiloso
<b>Kama fugito</b>	348.42 b	154.52 a	497.06 a	Argiloso

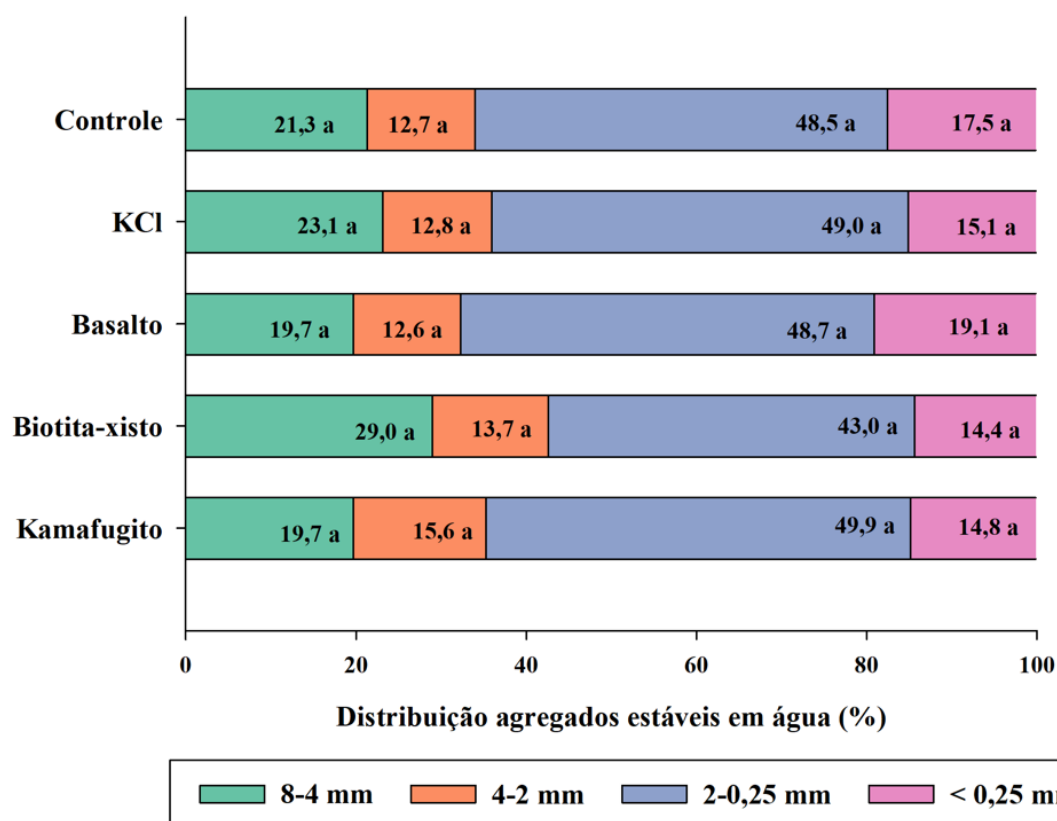
Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

## 6.3 ESTABILIDADE DE AGREGADOS

A distribuição de classes de agregados estáveis em água não apresentou diferença significativa ( $p > 0,05$ ) entre os tratamentos, na profundidade de 0-60 cm. A formação de agregados é uma variável importante para estabilização da matéria orgânica do solo tendo em vista interações de ordem física, química e biológica (Silva *et al.*, 2016; Six *et al.*, 2002a; 2002b; Carvalho *et al.*, 2023). A tendência de baixa representação de macro e microagregados (Figura 5) em relação as demais classes, possivelmente, influenciou a baixa estabilização da fração particulada (proteção física) e de compostos orgânicos pela sorção nos minerais (COAM), respectivamente. A proporção média de microagregados na camada 0-60 cm foi inferior a 20% para todos os tratamentos. No geral, observou-se uma tendência à predominância ( $\sim 50\%$ ) de mesoagregados ( $2-0,25 \text{ mm}$ ), condição

distinta ao observado por Silva *et al.* (2022) que verificou ~90% dos agregados em classes maiores de 2 mm em pastagem. Somado a esse fator, observou-se uma diferença significativa entre os tratamentos no que tange a floculação (Tabela 5). A capacidade floculação está associada a minerais de argila como a caulinita e óxidos e hidróxidos metálicos (Fe Al) promovido pela interação eletrostática (Six *et al.*, 2002a). Essa tendência das argilas do solo a flocularem, provavelmente geram núcleos de formação mais densos, desfavorecendo, assim, a formação de macroagregados.

No que tange aos diâmetros médios ponderado (DMP) e geométrico (DMG) não foram verificados efeitos significativos entre os tratamentos ( $p < 0,05$ ) (Tabela 6). O DMG apresentou uma variação média de 2,12 – 2,64 mm, ao passo que DMG variou 1,26 a 1,59 mm na camada de 0-60 cm. A proporção de agregados mais concentrada na classe de mesoagregados possivelmente impactou os resultados índices DMP e DMG. As médias observadas, no geral, são menores em comparação a pastagens cultivadas em Latossolos no Cerrado. Costa Júnior *et al.* (2012), avaliando pastagem *U. brizantha*, reportou um média de 3,91 mm para DMP e 2,46 mm DMG. Silva *et al.* (2022), por seu turno, quantificou médias de 4,60 e 4,08 e mm para DMP e DMG, respectivamente. Esses valores maiores podem ter sido influenciados pela alta representatividade de macroagregados no Latossolo (~90%) (Silva *et al.*, 2022). Contudo, menores diâmetros médios – 1,32 mm (DMP) e 0,84 mm (DMG) – foram observados em pastagem três anos após a implantação, período em que a estabilização dos agregados do solo ainda está em processo de formação (Wendling *et al.*, 2012).



**Figura 5.** Média da distribuição de agregados estáveis em água (%), por classe de tamanho (mm), nos diferentes tratamentos na camada 0-60 cm. Os tratamentos não apresentaram diferença significativa pelo teste F ( $p > 0,05$ ).

**Tabela 5.** Porcentagem de floculação dos tratamentos por classe de camada em Latossolo Vermelho-Amarelo.

Tratamento	Floculação (%)		
	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
Controle	65.10 b	67.70 a	58.06 ab
KCl	73.34 ab	63.98 ab	55.65 b
Basalto	76.01 a	66.23 a	64.52 a
Biotita-xisto	73.74 a	62.78 ab	61.45 ab
Kamafugito	77.15 a	58.61 b	60.54 ab

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

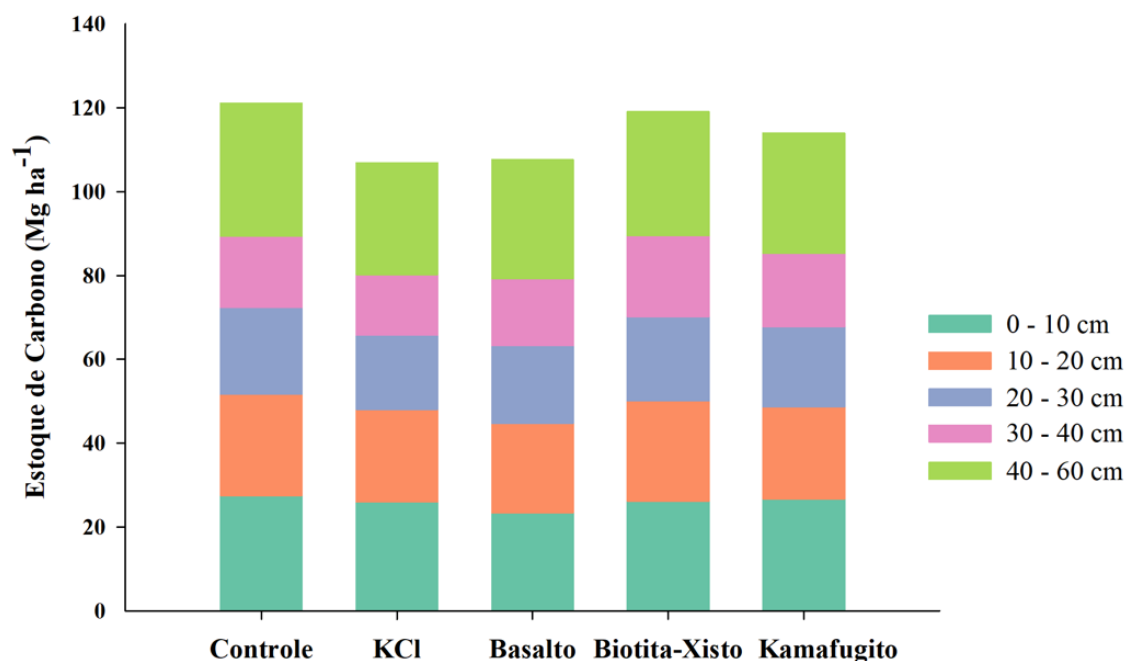
**Tabela 6.** Diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) dos tratamentos no perfil 0-60 cm em Latossolo Vermelho-Amarelo.

Tratamento	DMP	DMG
	----- mm -----	
<b>Controle</b>	2.23	1.26
<b>KCl</b>	2.34	1.37
<b>Basalto</b>	2.13	1.26
<b>Biotita-xisto</b>	2.65	1.60
<b>Kamafugito</b>	2.23	1.33

Os tratamentos não apresentaram diferença significativa pelo teste F ( $p > 0,05$ ).

#### 6.4 ESTOQUES DE CARBONO TOTAL DO SOLO

Não foram constatadas diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) para os estoques de carbono (EstC) entre os tratamentos, mesmo com variações substanciais nas camadas de 0-60 cm, de 106,83 a 121,07 Mg ha<sup>-1</sup> para C (Figura 6). Apesar da ausência de diferença significativa entre os tratamentos, os conteúdos acumulados no perfil são equiparáveis aos estoques médios de C para vegetação nativa (117 Mg ha<sup>-1</sup>) e para áreas sob rotação soja-milho (110,4 Mg ha<sup>-1</sup>) em Latossolo durante três décadas (Ferreira *et al.*, 2016). As médias observadas no presente estudo também são compatíveis com as médias gerais de estoque de C para Latossolos (98,2 Mg ha<sup>-1</sup>) (Gomes *et al.*, 2019) e para vegetação nativa de Cerrado (121,23 Mg ha<sup>-1</sup>) (Gonçalves *et al.*, 2024). Estudos recentes que avaliaram o efeito de minerais silicáticos no teor carbono do solo não quantificaram o parâmetro estoque, tampouco foram identificados trabalhos que avaliassem teores e estoques de N para tais fontes de tratamento (Buss *et al.*, 2023; Reis *et al.*, 2024; Rodrigues *et al.*, 2024a, 2024b).



**Figura 6.** Estoques de carbono do solo ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) nos diferentes tratamentos em diferentes camadas do solo (0-60 cm) cultivado com *Urochloa brizantha* cv. Paiaguás, por sete anos. Tratamentos sem diferença significativa pelo teste F ( $p > 0,05$ ).

## 6.5 FRAÇÕES FÍSICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

No presente estudo, os tratamentos não apresentaram diferenças ( $p > 0,05$ ) nas frações particulada e associada aos minerais (Figura 7). O COP apresentou variações de 13,23 a 16,32  $\text{g kg}^{-1}$ , 9,12 a 10,78  $\text{g kg}^{-1}$  e 5,44 a 7,09  $\text{g kg}^{-1}$  para as profundidades 0-10, 10-20 e 20-30 cm, respectivamente. Os resultados são consistentes com ensaio de incubação realizado com *Triticum aestivum* cv. Condo cujos resultados não foram significativos pelo teste F ( $p > 0,05$ ) para COP, condição semelhante ao observado no presente estudo. Ressalta-se que o referido trabalho foi o único identificado na literatura que, mediante experimento para fins agronômicos, quantificou as frações granulométricas COP e COAM no solo após incorporação de agrominerais silicáticos (Buss *et al.*, 2023).

Considerando a camada 0-30 cm verificou-se uma maior participação do COP no CT. Em ordem decrescente, a relação COP:CT foi: kamafeugito (56,90%) > biotita-xisto (54,37%) > basalto (53,72%) > controle (53,18%) > KCl (52,33%). Essas porcentagens são similares àquelas relatadas por Figueiredo *et al.* (2013) que observaram uma relação de 46 % de COP:CT em pastagem, o que demonstra o potencial da cultura manejada com agrominerais silicáticos em acumular C na fração particulada. Considerando as camadas



individualmente, os maiores teores de COP são observados próximo a superfície tendo em vista a influência da entrada de C oriundo da biomassa da parte aérea, maior concentração do sistema radicular e atividade microbiológica, o que indica a sensibilidade dessa fração frente as mudanças promovidas por manejo do solo e cultura presente na área. (Santos *et al.*, 2024, Souza *et al.*, 2024). O C constituinte da matéria orgânica particulada está associada a fração areia ( $>53 \mu\text{m}$ ), por essa razão não possui a proteção química típica das interações minerais (Santos *et al.*, 2024), o que corrobora a sensibilidade da fração nas dinâmicas da matéria orgânica no sistema de manejo (Figueiredo *et al.*, 2018).

As médias de COP observadas foram, em geral, superiores às registradas em pastagens de *U. brizantha* cultivadas em Latossolos no Cerrado. Em pastagem com 30 anos sem manejo da fertilidade, foram reportadas médias de  $6,6 \text{ g kg}^{-1}$  e  $4,4 \text{ g kg}^{-1}$  de COP no solo, nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente (Dias *et al.*, 2022). Para uma pastagem em Latossolo com sete anos e adubação convencional na implantação, verificaram-se médias de  $10,42 \text{ g kg}^{-1}$  (0-10 cm) e  $8,74 \text{ g kg}^{-1}$  (10-20 cm) da fração particulada do solo (Silva *et al.*, 2022), valores inferiores aos observados no presente estudo para o mesmo período. De forma semelhante, em uma pastagem de cinco anos, manejada anualmente com adubação convencional e sem pastejo, observaram-se médias de  $14,5 \text{ g kg}^{-1}$  e  $10,4 \text{ g kg}^{-1}$  de COP no solo para as camadas de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente (Figueiredo *et al.*, 2013). Para as fontes biotita-xisto e kamaflutito, as médias de COP foram de  $14,95 \text{ g kg}^{-1}$  e  $16,32 \text{ g kg}^{-1}$  na camada de 0-10 cm e de  $10,78 \text{ g kg}^{-1}$  e  $10,76 \text{ g kg}^{-1}$  na camada de 10-20 cm, respectivamente.

O COAM, fração estável e quimicamente protegida pelos minerais do solo, apresentou um comportamento distinto ao COP, fração mais reativa e lábil. Verificou-se uma tendência de diminuição do COAM comparados ao controle e fonte solúvel (Figura 7). O COAM variou de  $8,21 \text{ g kg}^{-1}$ , com tratamento basalto, a  $9,27 \text{ g kg}^{-1}$ , para o controle, sem diferença significativa ( $p > 0,05$ ). Ademais, o COAM, surpreendentemente, apresentou um comportamento crescente com o aumento da profundidade com variações de  $7,30$  a  $8,91 \text{ g kg}^{-1}$  (0-10 cm),  $8,33$  a  $9,22 \text{ g kg}^{-1}$  (10-20 cm) e  $8,83$  a  $10,50 \text{ g kg}^{-1}$  solo (20-30 cm). Os menores teores de COAM nas camadas de 0-10 e 10-20 cm podem estar relacionados ao efeito *priming* (EP). Esse efeito se refere a mudança na MOS nativa pela aceleração ou retardamento na decomposição após a adição de matéria orgânica fresca (C) (Favaro *et al.*, 2025). Buss *et al.* (2023), em ensaio de incubação realizado com

*Triticum aestivum* cv. Condo em solo contendo basalto, reportou um aumento de 22% no teor de COAM em relação ao controle. Nas condições deste experimento, comportamento distinto foi observado com o basalto que apresentou uma redução de 11,43% de C associado aos minerais em relação ao controle. O basalto registrou a menor média entre os tratamentos nas camadas 0-10 (7,30 g kg<sup>-1</sup>) e 20-30 cm (8,33 g kg<sup>-1</sup>).

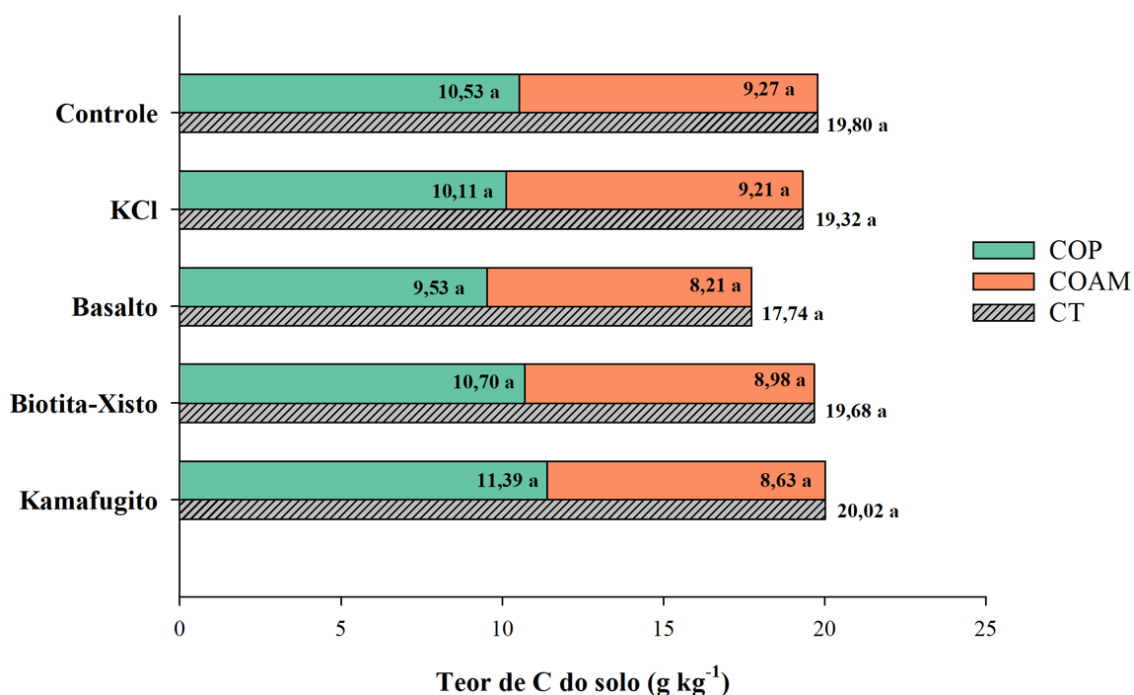
De forma geral, os resultados de COAM estão abaixo de médias registradas para pastagens em Latossolos no bioma Cerrado. Dias *et al.*, (2022) avaliando pastagem sem manejo da fertilidade observaram teores de 10,4 g kg<sup>-1</sup> (0-10 cm) e 10,3 g kg<sup>-1</sup> (10-20 cm) de COAM no solo. Silva *et al.* (2022), por sua vez, ao avaliarem pastagem com manejo convencional da fertilidade reportaram teores de 20,97 g kg<sup>-1</sup> (0-10 cm) e 21,09 de COAM no solo (10-20 cm). Contudo, é importante considerar que a alta representatividade do COP em relação ao C total no solo (> 50%) resultou em uma menor contribuição da fração associada aos minerais.

É importante ressaltar que o teor de N, elemento fundamental ao desenvolvimento da biota do solo, também pode influenciar as taxas de estabilização e decomposição da MOS (Kuśmierz *et al.*, 2023). Sob condições limitantes de N e entrada de C exógeno fresco, a microbiota aumenta a decomposição da MOS para obter C, N e outros nutrientes ao seu desenvolvimento (Favaro *et al.*, 2025). Considerando que *U. brizantha* é uma forrageira responsiva ao nitrogênio (Germano *et al.*, 2018; Domingues *et al.*, 2021), a adubação nitrogenada realizada apenas na implantação do experimento, aliada à remoção de biomassa em dois cortes anuais, pode ter tornado o N um fator limitante para os microrganismos, favorecendo um EP positivo.

Igualmente relevante é o impacto do pH do solo na estabilização da MOS, bem como na intensidade do efeito *priming* e nas interações eletrostáticas entre frações orgânicas e minerais. O pH influencia diretamente a composição e a intensidade da atividade enzimática dos microrganismos. De acordo com Wang e Kuzyakov (2024), solos com pH entre 5,5 e 7,5 representam a faixa que mais favorece a intensidade do EP positivo. Ademais, solos com pH tendendo ao alcalino podem reduzir os teores de MOS por meio de mecanismos como a diminuição da estabilidade dos agregados, a desprotonação de grupos funcionais e a redução da complexação da MOS com óxidos e hidróxidos de Fe e Al, bem como com minerais de argila, mediada pela troca de ligantes (Kuśmierz *et al.*, 2023; Wang e Kuzyakov, 2024).

No presente estudo, o pH do solo ( $\text{CaCl}_2$ ), após sete anos da implantação do experimento, variou de 6,19 a 6,67 para basalto e biotita-xisto, respectivamente, na camada 0-30 cm. Na implantação do experimento, em todas as parcelas, foram aplicados calcário dolomítico e termofosfato magnésiano. No caso do fornecimento de basalto, biotita-xisto e kamafigito, além das fontes citadas, foram incorporados os minerais que também possuem um efeito alcalinizante.

Nos tratamentos à base de silicato, após um ano da implantação, o pH variou na camada 0-10 cm, de 6,5 a 7,99 para basalto e biotita-xisto, respectivamente. No sexto ano o pH variou de 6,14 a 7,38 para basalto e biotita-xisto, respectivamente, na camada 0-10 cm. No sétimo ano, por sua vez, observou-se, na camada superior, uma variação de 6,20 a 6,77 para basalto e biotita-xisto, respectivamente. Essa faixa, tendendo a uma condição mais alcalinizante, pode ter influenciado mecanismos de estabilização da MOS. Com o pH tendendo a uma faixa mais alcalina (6,14 a 7,99) pode ter ocorrido, ao longo dos anos, dispersão de argilas e redução da adsorção da MOS em óxidos e hidróxidos, tornando frações estáveis, como o COAM, mais vulneráveis à decomposição impulsionada pelo EP (Kuśmierz *et al.*, 2023; Wang e Kuzyakov, 2024).



**Figura 7** Teor de C ( $\text{g kg}^{-1}$ ) nas frações particulada (COP), associada aos minerais (COAM) e carbono total (CT) pelo fracionamento físico granulométrico nos diferentes tratamentos cultivados com *Urochloa brizantha* cv. Paiaguás, por sete anos, nas camadas 0-30 cm. Os tratamentos não apresentaram diferença significativa pelo teste F ( $p > 0,05$ )

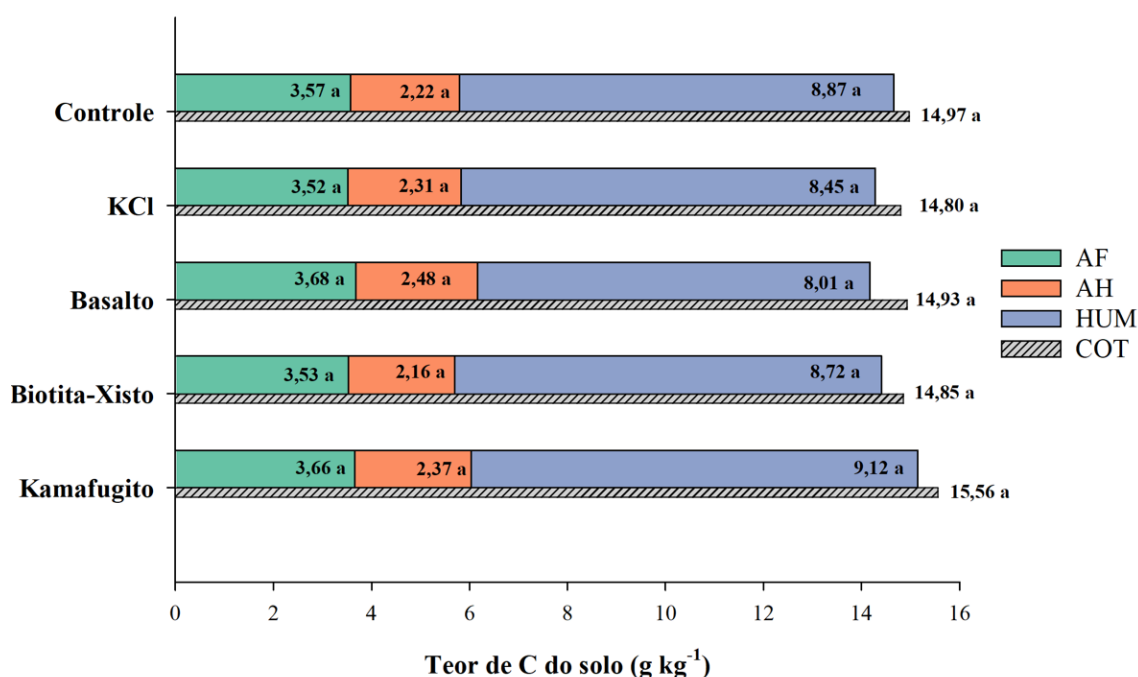
## 6.6 FRACIONAMENTO QUÍMICO DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

Os teores de carbono das substâncias húmicas (SH's), nas frações ácido fúlvico (C-AF), ácido húmico (C-AH) e humina (C-HUM), não foram afetadas estatisticamente pelos diferentes agrominerais silicáticos, nem pelo KCl ( $p > 0,05$ ) nas profundidades até 30 cm (Figura 8). As substâncias húmicas, por apresentarem maior grau de humificação, são menos sensíveis às alterações provocadas por manejos de curto prazo. No entanto, essas frações desempenham um papel importante na estabilização da matéria orgânica do solo (MOS). Entre as frações das substâncias húmicas, a maior concentração de C, entre os tratamentos, está na fração humina com, aproximadamente, 60% do conteúdo de C. Essa alta concentração de C na fração humina foi observado em outros estudos com pastagens, culturas anuais e sistemas integrados em latossolos no Cerrado (Figueiredo *et al.*, 2018; Dias *et al.*, 2019; Sousa *et al.*, 2024; Farias *et al.*, 2025).

É importante ressaltar que não foi encontrado na literatura acadêmica trabalho que avaliasse o fracionamento químico da matéria orgânica do solo em experimentos com agrominerais silicáticos. Contudo, apesar da ausência de diferença significativa entre os tratamentos, os teores de C observados nas frações são próximas as médias registradas na literatura para pastagens cultivadas em latossolos no Cerrado. Farias *et al.* (2025), ao avaliarem cultivo de *U. brizantha* com manejo convencional da fertilidade, verificaram, após 7 anos, médias de 2,38 g kg<sup>-1</sup>, 2,46 g kg<sup>-1</sup> e 8,46 g kg<sup>-1</sup> para C-AF, C-AH e C-HUM, respectivamente. O mesmo estudo avaliando pastagem degradada registrou teores de 1,48 g kg<sup>-1</sup>, 1,3 g kg<sup>-1</sup> e 7,06 g kg<sup>-1</sup> para C-AF, C-AH e C-HUM, respectivamente. Oliveira Netto *et al.* (2024), ao avaliarem pastagem com manejo da fertilidade verificaram teores de 3,32 g kg<sup>-1</sup>, 3,1 g kg<sup>-1</sup>, 2,43 g kg<sup>-1</sup> para C-AF, C-AH e C-HUM, respectivamente. Na mesma pesquisa foi registrado, para uma pastagem manejada com calagem e sem aplicação de fertilizantes, conteúdos de 3,21 g kg<sup>-1</sup>, 2,28 g kg<sup>-1</sup>, 1,99 g kg<sup>-1</sup> para C-AF, C-AH e C-HUM, respectivamente. As médias do presente estudo são superiores as registradas por Farias *et al.* (2025) e Oliveira Netto *et al.* (2024), especialmente quando comparada a pastagem degradada. Dias *et al.* (2019), avaliando *U. brizantha* sem manejo da fertilidade por 30 anos, registrou, respectivamente para as camadas de 0–10 e 10–20 cm, teores de 5,2 e 5,9 g kg<sup>-1</sup> de C-AF + C-AH, e 12,6 e 10,3 g kg<sup>-1</sup> de C-HUM. Por outro lado, Silva *et al.* (2022) observou em área de pastagem implantada com manejo da

fertilidade, teores de 6,08 e 5,46 g kg<sup>-1</sup> de C-AF, 3,86 e 5,01 g kg<sup>-1</sup> de C-AH, e 12,48 e 13,33 g kg<sup>-1</sup> de C-HUM, nas camadas de 0–10 e 10–20 cm respectivamente.

Semelhante comportamento foi observado para kama fugito no carbono orgânico total (COT), avaliado pelo método da combustão úmida em meio ácido, com tendência de aumento de 15,56 g kg<sup>-1</sup> de C no solo, em relação aos demais tratamentos (Figura 8). Em ensaio de incubação com basalto, em casa de vegetação, Rodrigues *et al.* (2024) observaram um aumento de 38% no COT em relação ao controle, para dose de 96 t ha<sup>-1</sup>. Segundo os autores esse incremento poderia estar relacionado a formação de novas fases minerais que, por seu turno, influenciaram na proteção física do C, reduzindo, assim, a oxidação da MOS



**Figura 8.** Teor de C (g kg<sup>-1</sup>) nas frações ácido fúlvico (C-AF), ácido húmico (C-AH), humina (C-HUM), pelo fracionamento químico das substâncias húmicas, e carbono orgânico total por combustão úmida (COT) nos diferentes tratamentos cultivados com *Urochloa brizantha* cv. Paiaguás, por sete anos, nas camadas 0-30 cm. Tratamentos sem diferença significativa pelo teste F ( $p > 0,05$ ).

## 6.7 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

Os atributos de fertilidade do solo — pH em CaCl<sub>2</sub>, potássio (K<sup>+</sup>), cálcio (Ca<sup>2+</sup>), magnésio (Mg<sup>2+</sup>), alumínio (Al<sup>3+</sup>), acidez potencial (H<sup>+</sup>Al), fósforo extraído por Mehlich 1 (PMeh 1), ferro (Fe), soma de bases trocáveis (SB), capacidade de troca catiônica

efetiva (CTC efetiva), capacidade de troca catiônica a pH 7 (CTC total) e saturação por bases (V) — não foram afetados pela aplicação de agrominerais silicáticos e KCl ( $p > 0,05$ ) até a profundidade de 10 cm, camada na qual foi incorporado o agromineral silicáticos (Tabela 7). Já os micronutrientes zinco (Zn), manganês (Mn) e cobre (Cu) apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos ( $p < 0,05$ ) nas camadas de 0–10 cm (Tabela 8).

Os minerais silicáticos, à medida que são intemperizados, constituem fontes de liberação gradativa de potássio para o solo (Krahl *et al.*, 2020; Reis *et al.*, 2024). Esse macronutriente, na forma iônica, torna-se disponível para as plantas, ou seja, presente tanto na solução do solo quanto adsorvido aos colóides argila e à MOS. No presente estudo, na camada de 0–10 cm, os teores de  $K^+$  no solo ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) foram: 0,27 para kamafigito e 0,09 para controle, com ausência de diferença significativa entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ) (Tabela 7).

Antes da implantação do experimento, o teor de  $K^+$  no solo era de 0,09  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  (Tabela 1). Os teores atuais estão acima do nível crítico de 0,14  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  recomendado para *U. brizantha* cultivada no Cerrado (Martha Júnior *et al.*, 2007). De acordo com os dados obtidos, para a dose de 40 t  $\text{ha}^{-1}$  de kamafigito, verificou-se um teor de 0,27  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de  $K^+$  (Tabela 7). Os teores observados neste estudo são superiores aos registrados em pastagens sob manejo extensivo (0,09  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em Latossolo do Cerrado (Farias *et al.*, 2025). Para o kamafigito, a manutenção de teores acima do nível crítico pode ter sido favorecida pela formação de novas fases minerais, conforme sugerido por Rodrigues *et al.* (2024a, 2024b).

No que se refere a  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , os teores desses nutrientes não foram afetados pelos agrominerais silicáticos ou KCl ( $p > 0,05$ ). Basalto, xisto biotítico e kamafigito são ricos em Ca e Mg na forma de silicatos e/ou carbonatos (Tabela 1), tornando esses nutrientes disponíveis por intemperismo biológico (Krahl *et al.*, 2022a; Reis *et al.*, 2024; Rodrigues *et al.*, 2024b). Na camada de 0–10 cm, os teores variaram entre 1,67 e 2,52  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para  $\text{Ca}^{2+}$  e entre 1,04 e 1,76  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para  $\text{Mg}^{2+}$  (Tabela 7). Estudo com basalto incubado por 170 dias indicou aumento de 2,55  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para  $\text{Ca}^{2+}$  e 0,83  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para  $\text{Mg}^{2+}$  em relação ao momento da implantação do experimento (Rodrigues *et al.*, 2024a). Na presente pesquisa, apesar da tendência de aumento comparado aos valores iniciais (Tabelas 1 e 7), destaca-se que todas as parcelas receberam calcário dolomítico e

termofosfato magnesiano, ambas fontes de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , não sendo possível isolar o efeito exclusivo dos minerais silicáticos.

O pH em  $\text{CaCl}_2$  variou entre 5,1 (basalto) a 5,7 (biotita-xisto) na camada de 0–10 cm, sem diferença significativa entre os tratamentos ( $p > 0,05$ ) (Tabela 7). Rodrigues *et al.* (2024a) observou variações de 4,7 a 5,5 no pH de Latossolos tratados com basalto com doses entre 12 e 96 t ha<sup>-1</sup>. Em pastagem permanente de *U. brizantha* em Latossolo no Cerrado, Farias *et al.* (2025) observaram pH 4,50 (camada 0–10 cm) e Augusto *et al.* (2024) pH 5,02 (camada 0–20 cm).

Os tratamentos apresentaram diferenças significativas para micronutrientes Zn, Mn e Cu ( $p < 0,05$ ) na camada de 0–10 cm (Tabela 8). As médias obtidas para Zn, Mn e Cu são consideradas elevadas em relação aos teores recomendados para *U. brizantha* no Cerrado (Martha Júnior *et al.*, 2007). Embora os agrominerais silicatados forneçam micronutrientes (Rodrigues *et al.*, 2020a, 2024b), os aumentos observados em comparação ao controle e ao KCl não podem ser atribuídos exclusivamente aos tratamentos, já que FTE 12 e termofosfato magnesiano, ambas fontes de micronutrientes, também foram incorporados. Apesar disso, os valores observados são considerados adequados e, em alguns casos, superiores aos relatados na literatura para *U. brizantha* cultivada em Latossolo no Cerrado (Augusto *et al.*, 2024; Rodrigues *et al.*, 2024b; Leite *et al.*, 2025; Farias *et al.*, 2025).

Cabe destacar que estudos recentes têm enfatizado o efeito dos agrominerais sobre o acúmulo de nutrientes na matéria seca das plantas (Ferreira *et al.*, 2020; Krahel *et al.*, 2020; 2022a; Marchi *et al.*, 2024). Verifica-se, entretanto, uma lacuna de informações sobre a dinâmica de nutrientes no solo quando utilizados minerais silicáticos como fonte. Sugere-se o desenvolvimento de estudos que avaliem o impacto desses materiais sobre os atributos químicos do solo, com ênfase em análises de longo prazo.

**Tabela 7.** Atributos químicos do solo sob cultivo de *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás após sete anos da incorporação de minerais silicáticos em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico no Cerrado na camada 0-10 cm.

Tratamento	pH	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H + Al	P <sub>Meh 1</sub>	SB	CTC efetiva	CTC total	V
	CaCl <sub>2</sub>		-----	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	-----		mg dm <sup>-3</sup>	-----	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	-----	
0 - 10 cm											
Controle	5,60(±0,45)	0,09(±0,00)	2,18(±0,55)	1,32(±0,45)	0,00(±0,0)	3,82(±1,32)	6,21(±0,66)	3,59(±0,96)	3,59(±0,95)	7,41(±0,46)	48,91(±14,61)
KCl	5,19(±0,26)	0,14(±0,05)	1,87(±0,22)	1,35(±0,41)	0,00(±0,01)	4,81(±0,73)	5,92(±0,03)	3,35(±0,48)	3,35(±0,48)	8,16(±0,72)	41,16(±6,04)
Basalto	5,09 (±0,22)	0,14(±0,02)	1,67(±0,35)	1,04(±0,37)	0,00(±0,0)	4,85(±0,45)	5,77(±0,06)	2,84(±0,67)	2,84(±0,67)	7,70(±0,27)	36,79(±7,61)
Biotita-					0,00(±0,0)						
Xisto	5,37(±0,29)	0,12(±0,02)	2,10(±0,21)	1,38(±0,21)		4,36(±0,91)	5,94(±0,18)	3,59(±0,43)	3,60(±0,43)	7,95(±0,80)	45,52(±6,92)
Kamafugito	5,73(±0,13)	0,27(±0,17)	2,52(±0,16)	1,76(±0,29)	0,00(±0,0)	3,48(±0,53)	8,40(±3,55)	4,54(±0,15)	4,55(±0,15)	8,02(±0,47)	56,81(±4,19)

Os valores são referentes as médias ± desvio-padrão, entre parênteses. Tratamentos sem diferença significativa pelo teste de F ( $p > 0,05$ ). pH em CaCl<sub>2</sub>; K<sup>+</sup> = potássio trocável; Ca<sup>2+</sup> = cálcio trocável; Mg<sup>2+</sup> = magnésio trocável; Al<sup>3+</sup> = alumínio trocável; H+Al = acidez potencial; P<sub>Meh 1</sub> = fósforo extraído por Mehlich 1; SB = soma de bases trocáveis; CTC efetiva = capacidade de troca de cátions efetiva; CTC total = capacidade de troca de cátions a pH 7 e V = saturação por bases.

**Tabela 8.** Teor de micronutrientes Zn, Fe Mn e Cu do solo sob cultivo de *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás após sete anos da incorporação de minerais silicáticos em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico no Cerrado na camada 0-10 cm.

Tratamento	Zn	Fe	Mn	Cu
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----			
	0 – 10 cm			
Controle	11,11 (±3,95) ab	47,97 (± 12,21) a	13,30 (±2,68) ab	6,00 (±0,21) a
KCl	10,11 (±4,82) b	52,63 (± 3,84) a	11,68 (±1,05) b	5,89 (±0,63) a
Basalto	7,06 (±2,96) b	48,75 (± 2,98) a	10,51 (±2,96) b	5,73 (±0,11) a
Biotita-Xisto	9,48 (±2,62) b	49,25 (± 7,97) a	13,12 (±2,94) b	5,89 (±0,22) a
Kamafugito	18,61 (±0,77) a	72,94 (± 36,19) a	19,62 (±1,10) a	6,37 (±0,14) a

Os valores são referentes as médias ± desvio-padrão, entre parênteses. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Zn = zinco; Fe = ferro; Mn = manganês; Cu = cobre



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados indicaram que, nas condições estabelecidas neste experimento, os agrominerais silicáticos foram ineficazes para aumentar a quantidade de matéria orgânica do solo. Apesar da expectativa de incremento de carbono na fração de carbono associada aos minerais, devido à formação de novas fases minerais e seus produtos de dissolução, alguns tratamentos apresentaram redução, possivelmente em razão do efeito priming e de interações químicas no solo. A correção da acidez e a adubação realizadas na implantação, aliadas à extração contínua da biomassa das gramíneas ao longo de sete anos — que poderiam contribuir significativamente para o aporte de carbono — podem ter reduzido a eficácia dos tratamentos quanto à retenção de carbono nas frações de carbono lábil e estável. Ainda assim, o estudo fornece informações relevantes para orientar pesquisas futuras sobre o acúmulo de carbono em solos tratados com agrominerais silicáticos.

Pesquisas futuras, especialmente em ambientes tropicais, devem investigar os efeitos de longo prazo dos minerais silicáticos na dinâmica de nutrientes e na estabilização da matéria orgânica, por meio de experimentos especificamente desenhados para essa finalidade. Esses estudos devem considerar as características particulares de cada agromineral, incluindo sua capacidade de fornecer potássio, ou de corrigir a acidez do solo com a liberação de cálcio e magnésio. A elevação do pH promovida por cada fonte deve ser avaliada, uma vez que esse é um fator determinante para a captura e estabilização de carbono no solo. Além disso, o conteúdo de nutrientes adicionado deve ser analisado com base na fração efetivamente disponível dos minerais passíveis de dissolução durante o período experimental, e não apenas no teor total de nutrientes.

Fontes de silicatos potássicos podem ser consideradas como alternativas parciais ou integrais, dada sua taxa de dissolução mais lenta em relação às fontes solúveis de potássio. Para ajuste de pH e fornecimento de cálcio e magnésio, devem ser adotadas fontes que promovam a redução da acidez, conforme as recomendações para o uso de calcário, com ou sem suplementação adicional. É importante considerar também o efeito residual em fontes como o termofosfato magnésiano ou outra fonte adotada.

Sugere-se avaliar outras frações, a exemplo do carbono lábil, o carbono orgânico dissolvido e o carbono da biomassa microbiana, por serem indicadores mais sensíveis às mudanças de manejo em curto prazo e relevantes na dinâmica de nutrientes do solo. Além disso,

recomenda-se o desenvolvimento de experimentos que tenham uma avaliação do carbono do solo antes da implantação do experimento ou área nativa próxima como uma referência para avaliar a influência do manejo. Isso permitirá uma compreensão sobre mudanças carbono do solo e uma estimativa de ganho ou perda relativa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ANDA. Principais indicadores do setor de fertilizantes. 2024. Disponível em: [https://anda.org.br/wp-content/uploads/2024/02/Principais\\_Indicadores\\_2023.pdf](https://anda.org.br/wp-content/uploads/2024/02/Principais_Indicadores_2023.pdf). Acesso em: 03 fev. 2024.
- AUGUSTO, J. G. et al. Integrated crop-livestock versus conventional systems: Effects on the chemical and physical characteristics of an Oxisol. **Grass and Forage Science**, v. 79, n. 2, p. 254–264, 2024. DOI: 10.1111/gfs.12664
- BALDOCK, J.A. et al. Cycling and composition of organic matter in terrestrial and marine ecosystems. **Marine Chemistry**, v. 92, n. 1-4, p. 39-64, dez. 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marchem.2004.06.016>
- BAPTISTA, J. C. et al. Bacterial communities in soils as indicators of the potential of syenite as an agromineral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.57, e01414, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.01414>
- BAPTISTELLA, J. L. C. et al. *Urochloa* in Tropical Agroecosystems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, n. 9, p. 1-17, 5 ago. 2020. Frontiers. <http://dx.doi.org/10.3389/fsufs.2020.00119>
- BASAK, B. B. et al. Waste mineral powder supplies plant available potassium: evaluation of chemical and biological interventions. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 186, p. 114-120, mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.11.023>
- BASILE-DOELSCH, I.; BALESDENT, J.; PELLERIN, S. Reviews and syntheses: the mechanisms underlying carbon storage in soil. **Biogeosciences**, v. 17, n. 21, p. 5223-5242, 30 out. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/bg-17-5223-2020>
- BAYER, C. et al. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 7, p. 677-683, jul. 2004. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2004000700009>
- BECK, H. E. et al. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Scientific Data**, v. 5, n. 1, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- BELONI, T. et al. Large variability in drought survival among *Urochloa* spp. cultivars. **Grass and Forage Science**, v. 73, n. 4, p. 947-957, 30 jul. 2018. <http://dx.doi.org/10.1111/gfs.12380>
- BENEVIDES FILHO, P. R. R. et al. Potential soil remineralizers from silicate rock powders (SRP) as alternative sources of nutrients for agricultural production (Amazon region). **Minerals**, v. 13, n. 10, p. 1255, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13101255>
- BENITES, V. M, MADARI, B. & MACHADO, P. L. O. A. Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo. 2003. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/->

/publicacao/337076/extracao-e-fracionamento-quantitativo-de-substancias-humicas-do-solo-um-procedimento-simplificado-de-baixo-custo. Acesso em: 03 maio 2023.

BENITES, V. M. et al. Fracionamento químico da matéria orgânica. In: Teixeira; Donagemma; Fontana e Teixeira (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Brasília, DF: Embrapa. 2017.

BLASKOWSKI, A. E. et al. Potencial agromineral das rochas de descarte da mina de cromita Ipueira, Bahia. 2019. Disponível em: [http://dspace.cprm.gov.br/bitstream/doc/22678/1/potencial\\_agromineral\\_rochas\\_descarte.pdf](http://dspace.cprm.gov.br/bitstream/doc/22678/1/potencial_agromineral_rochas_descarte.pdf). Acesso em: 11 nov. 2023.

BONFIM-SILVA, E. M. et al. Wood ash and water availability in the production of Paiaguás-grass. **Ambiente e Água - an Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 14, n. 6, p. 1, 4 nov. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2424>

BORDONAL, R. O. et al. Changes in quantity and quality of soil carbon due to the land-use conversion to sugarcane (*Saccharum officinarum*) plantation in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 240, p. 54-65, mar. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.016>

BRASIL. Instrução Normativa Nº 5, de 10 de março de 2016. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/GABINETE DA MINISTRA. Brasília, DF, 14 mar. 2016. Disponível em: [https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393137/do1-2016-03-14-instrucao-normativa-n-5-de-10-de-marco-de-2016-21393106](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393137/do1-2016-03-14-instrucao-normativa-n-5-de-10-de-marco-de-2016-21393106). Acesso em: 20 abr. 2023.

BRASIL. Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. Altera a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os minerais silicáticos como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências. Lei Nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. Brasília, 10 dez. 2013. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2013/Lei/L12890.htm#art1](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2013/Lei/L12890.htm#art1). Acesso em: 15 abr. 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. ComexStat: estatísticas de comércio exterior. Brasília: MDIC, 2025. Base de dados. Disponível em: <https://comexstat.mdic.gov.br/pt/comex-vis/4/562>. Acesso em: 23 abr 2025.

BURBANO, D. F. M. et al. Crushed volcanic rock as soil remineralizer: A strategy to overcome the global fertilizer crisis. **Natural Resources Research**, v. 31, n. 5, p. 2197–2210, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11053-022-10107-x>

BUSS, W. et al. Stabilisation of soil organic matter with rock dust partially counteracted by plants. **Global Change Biology**, v. 30, n. 1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.17052>

CABALLERO, C. B.; RUHOFF, A.; BIGGS, T. Land use and land cover changes and their impacts on surface-atmosphere interactions in Brazil: A systematic review. **The Science of the Total Environment**, v. 808, n. 152134, p. 152134, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152134>

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>

CARVALHO, A. M. et al. Soil Carbon Stocks and Greenhouse Gas Mitigation of Agriculture in the Brazilian Cerrado - A Review. **Plants**, v. 12, n. 13, p. 2449, 26 jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12132449>

CARVALHO, J. L. N. *et al.* Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 1, p. 175–186, 2010. DOI: 10.1016/j.still.2010.07.011

CICERI, D. et al. Characterization of potassium agrominerals: correlations between petrographic features, comminution and leaching of ultrapotassic syenites. **Minerals Engineering**, v. 102, p. 42-57, mar. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.11.016>

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

CORBETT, T. D. W. et al. Organic carbon source controlled microbial olivine dissolution in small-scale flow-through bioreactors, for CO<sub>2</sub> removal. **Npj Materials Degradation**, v. 8, n. 1, p. 1-13, 2 abr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41529-024-00454-we01467>

COSTA JUNIOR, C. et al. Carbono em agregados do solo sob vegetação nativa, pastagem e sistemas agrícolas no bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1311-1322, ago. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832012000400025>

DIAS, F. P. M. et al. Effects of land-use change on chemical attributes of a Ferralsol in Brazilian Cerrado. **Catena**, v. 177, p. 180-188, jun. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2019.02.016>

DOMINGUES, A. A. et al. Nitrogen fertilization of paiguás grass: production and nutrition. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 8, n. 2, e5918, abr./jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.32404/rean.v8i2.5918>

DOU, S. et al. Are humic substances soil microbial residues or unique synthesized compounds? A perspective on their distinctiveness. **Pedosphere**, v. 30, n. 2, p. 159-167, abr. 2020. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s1002-0160\(20\)60001-7](http://dx.doi.org/10.1016/s1002-0160(20)60001-7)

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Improving nutrient use efficiency of annual crops in brazilian acid soils for sustainable crop production. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, n. 7-8, p. 1303-1319, 30 abr. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1081/CSS-100104114>

FARIAS, P. I. V. et al. The fertilizer industry in Brazil and the assurance of inputs for biofuels production: Prospective scenarios after COVID-19. **Sustainability**, v. 12, n. 21, p. 8889, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12218889>

FAVARO, A. et al. Differences between priming and rhizosphere priming effects: Concepts and mechanisms. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 205, p. 109769, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109769>

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo. 2008. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/792567/1/COT69.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2023.

FERNANDES, P. B. et al. Sustainable Production of Maize with Grass and Pigeon Pea Intercropping. **Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 1246, 14 jun. 2023. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture13061246>

FERREIRA, B. C. et al. Kamaufugite from the Alto Paranaíba province as a multi-nutrient fertilizer. **Journal of Agricultural Science**, v. 12, n. 10, p. 213, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v12n10p213>

FERREIRA, E. A. B. et al. Carbon Stocks in Compartments of Soil Organic Matter 31 Years after Substitution of Native Cerrado Vegetation by Agroecosystems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, Mg, v. 40, p. 1-15, 22 out. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150059>

FERREIRA, R. C. U. et al. An Overview of the Genetics and Genomics of the Urochloa Species Most Commonly Used in Pastures. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 1-22, 13 dez. 2021. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2021.770461>

FIGUEIREDO, C. C. et al. Relationships between soil organic matter pools and nitrous oxide emissions of agroecosystems in the Brazilian Cerrado. **Science of the Total Environment**, v. 618, p. 1572–1582, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.333>

FIGUEIREDO, C. C. et al. Stratification ratio of organic matter pools influenced by management systems in a weathered Oxisol from a tropical agro-ecoregion in Brazil. **Soil Research**, v. 51, n. 2, p. 133, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1071/SR12186>

FINLAY, R. D. et al. Reviews and syntheses: biological weathering and its consequences at different spatial levels : from nanoscale to global scale. **Biogeosciences**, v. 17, n. 6, p. 1507-1533, 25 mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-17-1507-2020>

FRANCO, A.J. et al. Plant diversity in integrated crop-livestock systems increases the soil enzymatic activity in the short term. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, p. 1-11, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-40632020v5064026>

GEORGIU, K. et al. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, p. 1-12, 1 jul. 2022. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-022-31540-9>

GERMANO, L. H. E. et al. Produtividade e características agronômicas de Brachiaria brizantha cv. Paiaguás submetida a doses de nitrogênio sob cortes. **Boletim de Indústria Animal**, v. 75, p. 1-14, 2018. Instituto do Zootecnia. <http://dx.doi.org/10.17523/bia.2018.v75.e1419>

GOMES, L. C. et al. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. **Geoderma**, v. 340, p. 337–350, 2019.

GOSCH, M. S. et al. Landsat-based assessment of the quantitative and qualitative dynamics of the pasture areas in rural settlements in the Cerrado biome, Brazil. **Applied Geography**, v. 136, n. 102585, p. 102585, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102585>

HARTMANN, J. et al. Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification. **Reviews of**

**Geophysics**, v. 51, n. 2, p. 113-149, 2013. DOI: [https://doi-org.ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1002/rog.20004](https://doi.org/ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1002/rog.20004)

HAYNES, R.J. Labile Organic Matter Fractions as Central Components of the Quality of Agricultural Soils: an overview. **Advances in Agronomy**, p. 221-268, 2005. Elsevier. [http://dx.doi.org/10.1016/s0065-2113\(04\)85005-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0065-2113(04)85005-3)

HOFFLAND, E. et al. Eco-functionality of organic matter in soils. **Plant and Soil**, v. 455, n. 1-2, p. 1-22, 17 ago. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-020-04651-9>

IPCC. 2006 IPCC **Guidelines for national greenhouse gas inventories**: agriculture, forestry and Other land use - Introduction. v. 4. 2006. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4\\_Volume4/V4\\_01\\_Ch1\\_Introduction.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_01_Ch1_Introduction.pdf). Acesso em: 30 nov. 2023.

IPCC. Climate Change 2022 - **Mitigation of Climate Change**. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. p. 747 – 860. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157926.009>

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (org.). Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas: Brasília, 2012 relatório de pesquisa. Brasília: Ipea, 2012. 46 p. Disponível em: [https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP\\_Diagn%C3%B3stico\\_2012.pdf](https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP_Diagn%C3%B3stico_2012.pdf). Acesso em: 20 abr. 2023.

IPNI. *Urochloa*. International Plant Names Index. Disponível em: <https://ipni.org/?page=1&q=Urochloa>. Acesso em: 05 dez. 2023.

JANZEN, H.H. Carbon cycling in earth systems—a soil science perspective. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 104, n. 3, p. 399-417, dez. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.040>

KELLAND, M. E. et al. Increased yield and CO<sub>2</sub> sequestration potential with the C<sub>4</sub> cereal Sorghum bicolor cultivated in basaltic rock dust-amended agricultural soil. **Global Change Biology**, v. 26, n. 6, p. 3658–3676, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15089>

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. **Aggregate stability and size distribution**. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods, v. 5, p. 425-442, 1986.

KHANGURA, R. et al. Regenerative agriculture: a literature review on the practices and mechanisms used to improve soil health. **Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 2338, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15032338>

KOPITTKKE, P. M. et al. Ensuring planetary survival: the centrality of organic carbon in balancing the multifunctional nature of soils. **Critical Reviews in Environmental Science And Technology**, v. 52, n. 23, p. 4308-4324, 10 jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.2024484>

KRAHL, L. L. et al. Dissolution of silicate minerals and nutrient availability for corn grown successively. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.57, e01467, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.01467>

- KRAHL, L. L. et al. Increase in cation exchange capacity by the action of maize rhizosphere on Mg or Fe biotite-rich rocks. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, p. 1-10, 28 mar. 2022b. FapUNIFESP (SciELO). DOI: 10.1590/1983-40632022v5272376
- KRAHL, L. L. et al. Successive off take of elements by maize grown in pure basalt powder. **African Journal of Agricultural Research**, v. 15, n. 2, p. 229-239, 29 fev. 2020. Academic Journals. DOI: 10.5897/AJAR2019.14546
- KUŚMIERZ, S. et al. Soil Organic Carbon and Mineral Nitrogen Contents in Soils as Affected by Their pH, Texture and Fertilization. **Agronomy**, v. 13, n. 1, p. 267, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13010267>
- KUWI, S. O. et al. Genetic diversity and population structure of Urochloa grass accessions from Tanzania using simple sequence repeat (SSR) markers. **Brazilian Journal of Botany**, v. 41, n. 3, p. 699-709, 24 jul. 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/s40415-018-0482-8>
- LAL, R. Intensive Agriculture and the Soil Carbon Pool. **Journal of Crop Improvement**, v. 27, n. 6, p. 735-751, 2 nov. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/15427528.2013.845053>
- LEFEBVRE, D. et al. Assessing the potential of soil carbonation and enhanced weathering through Life Cycle Assessment: a case study for sao paulo state, brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 233, p. 468-481, out. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.099>
- LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, v. 528, n. 7580, p. 60-68, 23 nov. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nature16069>
- LEITE, F. F. G. D. *et al.* Land use change effect on organic matter dynamics and soil carbon sequestration in the Brazilian Cerrado: A study case in Mato Grosso do Sul state (Midwest-Brazil). **Catena**, v. 249, p. 108670, 2025. DOI: 10.1016/j.catena.2024.108670
- LIANG, C. et al. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter. **Global Change Biology**, v. 25, n. 11, p. 3578-3590, 18 set. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.14781>
- LIMA, C. E. P. et al. Compartimentos de carbono orgânico em Latossolo cultivado com hortaliças sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 4, p. 378-387, abr. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016000400011>
- LISBOA, L. A. M. et al. Característica bromatológica y morfológica de las plantas forrajeras. *Investigación Agraria*, v. 23, n. 1, p. 22-27, 30 jun. 2021. **Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Salud**. DOI: <http://dx.doi.org/10.18004/investig.agrar.2021.junio.2301602>
- LIU, X. et al. A global meta-analysis of the impacts of no-tillage on soil aggregation and aggregate-associated organic carbon. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 18, p. 5292-5305, 8 nov. 2021. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.4109>
- LOCATELLI, Jorge L. et al. Changes in soil organic matter fractions induced by cropland and pasture expansion in Brazil's new agricultural frontier. **Geoderma Regional**, v. 28, p. 1-11, mar. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00474>



- LOSS, A. et al. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. **Ciência Rural**, v. 39, n. 4, p. 1067-1072, 20 mar. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782009005000036>
- LUO, Z. et al. Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. **Global Change Biology**, v. 23, n. 10, p. 4430-4439, 26 jun. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.13767>
- MACHADO, W. et al. Carbon in aggregate size classes in a Rhodic Eutrudox under different cropping systems. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 40, n. 4, p. 1709, 7 jun. 2019. Universidade Estadual de Londrina. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n4p1709>
- MANNING, D. A. C. et al. Testing the ability of plants to access potassium from framework silicate minerals. **The Science of the Total Environment**, v. 574, p. 476–481, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.086>
- MANNING, D. A. C. How will minerals feed the world in 2050? **Proceedings of the Geologists' Association**, v. 126, n. 1, p. 14-17, fev. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pgeola.2014.12.005>
- MANNING, D. A. C. Innovation in Resourcing Geological Materials as Crop Nutrients. **Natural Resources Research**, v. 27, n. 2, p. 217-227, 1 jun. 2017. DOI: 10.1007/s11053-017-9347-2
- MAO, X. et al. Soil parent material controls organic matter stocks and retention patterns in subtropical China. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, n. 5, p. 2426-2438, 14 mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02578-3>
- MAPBIOMAS. Base de dados de cobertura e uso da terra. Versão: 8.0, Brasil, 2023. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 27 nov. 2023.
- MARCHI, G. et al. Growth of *Urochloa* grass in an oxisol treated with powdered silicate materials. **Peer Review**, v. 6, n. 2, p. 248–272, 2024. DOI: 10.53660/PRW-1759-3409
- MARTHA JUNIOR, G. B. et al. **Cerrado**: uso eficiente de corretivos e fertilizantes em pastagens. Planaltina: Embrapa. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1113533/1/Livro.pdf>. Acesso em: 4 maio 2023.
- MARTINS, É. S. et al. Agrominerais - rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. In: LUZ, A. B. et al (ed.). Rochas e minerais industriais: usos e especificações. 2. ed. Brasil: Cetem-McT, 2008. Cap. 9. p. 205-222.
- MATIAS, F. I. et al. *Urochloa* spp. multivariate performance: similarities and divergences among intra : and interspecific populations. **Crop Science**, v. 61, n. 2, p. 1104-1116, 22 dez. 2020. <http://dx.doi.org/10.1002/csc2.20401>
- MEDEIROS, F. P. et al. Rock Powder Enhances Soil Nutrition and Coffee Quality in Agroforestry Systems. **Sustainability**, v. 16, n. 1, p. 354, 30 dez. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16010354>

MENDONÇA, E. S. & MATOS, E. S. **Matéria Orgânica do Solo**: métodos de análises. 2 ed. Viçosa, MG: UFV-Gefert, 2017.

MINASNY, B. et al. Soil carbon 4 per mille. **Geoderma**, v. 292, p. 59-86, abr. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>

MONTAGNER, D. B. et al. Potencial produtivo dos capins BRS Piatã e BRS Paiguás em sistema de integração lavoura-pecuária. 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/179584/1/Potencial-produtivo-dos-capins-BRS.pdf>. Acesso em: 06 dez 2023.

NASCIMENTO, P. C. et al. Sistemas de manejo e a matéria orgânica de solo de várzea com cultivo de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1821–1827, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600030>

NEWTON, P. et al. What is regenerative agriculture? A review of scholar and practitioner definitions based on processes and outcomes. *Frontiers in sustainable food systems*, v. 4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.577723>

NUNES, J. M. G.; KAUTZMANN, R. M.; OLIVEIRA, C. Evaluation of the natural fertilizing potential of basalt dust wastes from the mining district of Nova Prata (Brazil). **Journal of cleaner production**, v. 84, p. 649–656, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.032>

OGINO, C. M. et al. Poder de compra, preço e consumo de fertilizantes minerais: uma análise para o centro-oeste brasileiro. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 59, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.220367>.

OGINO, C. M.; GASQUES, J. G.; VIEIRA FILHO, J. E. R. Relação dinâmica: fertilizantes minerais e agricultura brasileira. Brasília, DF: Ipea, out. 2023. 40 p. DOI: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/12502>

OLIVEIRA, A. J. J. G. F. D. *et al.* Cropping and soil management systems effects on soil organic matter fractions in diversified agricultural fields in the Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, p. e0240017, 2024. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbs20240017>

PAIVA FILHO, S. V. et al. Atributos físicos do solo em área com capim brizantha e ruziziensis. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 11, n. 1, p. 366-374, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21206/rbas.v11i1.12846>

PEREIRA, O. et al. Assessing pasture degradation in the Brazilian Cerrado based on the analysis of MODIS NDVI time-series. *Remote sensing*, v. 10, n. 11, p. 1761, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10111761>

PESSOA-FILHO, M. et al. Molecular dating of phylogenetic divergence between *Urochloa* species based on complete chloroplast genomes. **Bmc Genomics**, v. 18, n. 1, p. 1-14, 6 jul. 2017. <http://dx.doi.org/10.1186/s12864-017-3904-2>

PHUKUBYE, K. et al. On the impact of grassland management on soil carbon stocks: a worldwide meta-analysis. **Geoderma Regional**, v. 28, p. 1-11, mar. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00479>

- PINHEIRO, F. M. et al. Soil carbon stock and stability under Eucalyptus-based silvopasture and other land-use systems in the Cerrado biodiversity hotspot. **Journal of Environmental Management**, v. 299, p. 113676, dez. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113676>
- POLICARPO, V. H. C. et al. Parâmetros de raiz e atributos físicos do solo com cultivo de forrageiras dos gêneros *Panicum* e *Urochloa*. **Evidência**, v. 23, n. 2, p. 1-16, 17 ago. 2023. <http://dx.doi.org/10.18593/evid.32576>
- PRADO, R. B. et al. Mapping Soil Fertility at Different Scales to Support Sustainable Brazilian Agriculture. **International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering**, v. 6, n. 9, p. 769-777. 2012.
- PULIDO-MONCADA, M. et al. Using soil organic matter fractions as indicators of soil physical quality. **Soil Use and Management**, v. 34, n. 2, p. 187-196, 8 maio 2018. <http://dx.doi.org/10.1111/sum.12414>
- RALISCH, R. *et al.* Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 381–384, 2008.
- RAMOS, C. G. et al. Evaluation of the potential of volcanic rock waste from southern Brazil as a natural soil fertilizer. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2700–2706, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.006>
- RAMOS, C. G. et al. Possibilities of using silicate rock powder: an overview. **Geoscience Frontiers**. v. 13, n. 1, p. 101185, jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185>.
- RAMOS, F. T. et al. Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n. 9, p. 3595-3602, 23 fev. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.8881>
- REIS, B. R. et al. Changes in soil bacterial community structure in a short-term trial with different silicate rock powders. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 11, n. 1, p. 61, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-024-00586-w>
- REZENDE, P.R. et al. Productivity and nutrient extraction by Paiaguás palisadegrass, single and intercropping with pigeon pea, submitted to doses of nitrogen. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 74, n. 6, p. 1151-1160, dez. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4162-12827>.
- RIBEIRO, I. D. A. et al. Use of Mineral Weathering Bacteria to Enhance Nutrient Availability in Crops: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1-20, 11 dez. 2020. DOI: [10.3389/fpls.2020.590774](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.590774)
- RODRIGUES, M. et al. Paraná basin basalt powder: A multinutrient soil amendment for enhancing soil chemistry and microbiology. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 141, p. 104957, 2024a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104957>
- RODRIGUES, M. et al. Unlocking higher yields in *Urochloa brizantha*: the role of basalt powder in enhancing soil nutrient availability. **Discover Soil**, v. 1, n. 1, p. 4, 2024b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44378-024-00006-3>

RUIZ POTMA GONÇALVES, D. *et al.* Accessing and modelling soil organic carbon stocks in Prairies, Savannas, and forests. **Catena**, v. 243, p. 108219, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108219>

Sá, M.A.C. *et al.* Produtividade da Cana de Açúcar e Atributos de Um Latossolo Acriférico do Cerrado Sob Plantio Direto e Convencional. **STAB**, VOL.40 No1; JAN / FEV / MAR 2022.

SALARIATO, D. L. *et al.* Molecular phylogeny of the subtribe Melinidinae (Poaceae: panicoideae). **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 56, n. 1, p. 355-369, jul. 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ympev.2010.02.009>

SALTON, J. C. Agregação do solo e estabilidade de agregados. In: Teixeira; Donagemma; Fontana e Teixeira (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Brasília, DF: Embrapa. 2017.

SANTOS FILHO, J. R. *et al.* Establishment of Paiaguás palisadegrass in monoculture or in an integration system with other crops. **Ciência Animal Brasileira**, v. 22, p. 1-13, 2021. DOI: 10.1590/1809-6891v22e-68211.

SANTOS, C. O. dos *et al.* Assessing the Wall-to-Wall Spatial and Qualitative Dynamics of the Brazilian Pasturelands 2010–2018, Based on the Analysis of the Landsat Data Archive. **Remote Sensing**, v. 14, n. 4, p. 1024, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14041024>

SANTOS, C. O. *et al.* Assessing the wall-to-wall spatial and qualitative dynamics of the Brazilian pasturelands 2010–2018, based on the analysis of the Landsat data archive. **Remote sensing**, v. 14, n. 4, p. 1024, 2022b. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14041024>

SANTOS, C. O. *et al.* Monitoring of carbon stocks in pastures in the savannas of Brazil through ecosystem modeling on a regional scale. **Land**, v. 12, n. 1, p. 60, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12010060>

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa. 2018.

SANTOS, J. A. D. *et al.* Fractions of Organic Matter and Soil Carbon Balance in Different Phases of an Agroforestry System in the Cerrado: A Ten-Year Field Assessment. **Soil Systems**, v. 8, n. 2, p. 44, 2024. DOI: 10.3390/soilsystems8020044

SCHREEFEL, L. *et al.* Regenerative agriculture – the soil is the base. **Global Food Security**, v. 26, n. 100404, p. 100404, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404>

SCHULTE, L. A. *et al.* Meeting global challenges with regenerative agriculture producing food and energy. **Nature Sustainability**, v. 5, n. 5, p. 384–388, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00827-y>

SEQUEIRA, C. H.; ALLEY, M. M. Soil Organic Matter Fractions as Indices of Soil Quality Changes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, n. 5, p. 1766-1773, set. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2011.0067>

SIGNOR, D. *et al.* Quantity and quality of soil organic matter as a sustainability index under different land uses in Eastern Amazon. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 3, p. 225-232, maio 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992x-2016-0089>

SILVA, A. N. *et al.* Effects of cover crops on the physical protection of organic matter and soil aggregation. **AUST J CROP SCI**, v. 10, p. 1623-1629, 2017.

SILVA, F. C. da (ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 627 p. ISBN 978-85-7383-430-7. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330496>. Acesso em: 14 maio 2023

SILVA, J. F. D. et al. Soil Organic Matter and Aggregate Stability in Soybean, Maize and *Urochloa* Production Systems in a Very Clayey Soil of the Brazilian Savanna. **Agronomy**, v. 12, n. 7, p. 1652, 2022.

SILVA, J. R. M. et al. Total organic carbon and the humic fractions of the soil organic matter in silvopastoral system. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 2, p. 1-6, 2020. DOI:10.5039/agraria.v15i2a6874

SILVA, L. J. et al. Soil carbon dynamics in integrated agricultural systems in Minas Gerais state, Brazil: a meta-analysis. **Geoderma Regional**, v. 36, p. 1-8, mar. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00761>

Silveira, A. B. et al. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes usos do solo e floresta nativa. **Scientia Forestalis**, 51, e3992, 2023. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v51.24>

SIX, J. et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. **Agronomie**, v. 22, n. 7-8, p. 755-775, nov. 2002a. DOI: <https://doi.org/10.1051/agro:2002043>

SIX, J. et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, n. 2, p. 155-176, abr. 2002b. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1016125726789>

SOARES, J. P. G. et al. Pasture organic management using thermopotassium and thermophosphate in the Cerrado region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 56, p. e01469, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.01469>

SOARES, R. et al. Determination of carbon stocks of humic substances and vulnerability to emissions in archaeological and non-archaeological soils of the central Amazon. **Revista Virtual de Química**, v. 15, n. 3, p. 452-463, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20220110>

SOUARE, A. et al. Potassium sources, microorganisms and plant nutrition: challenges and future research directions. **Pedosphere**, v. 33, n. 1, p. 105-115, fev. 2023. DOI: [doi: 10.1016/j.pedsph.2022.06.025](https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.025)

SOUSA, T. R. et al. Dynamics of Carbon and Soil Enzyme Activities under Arabica Coffee Intercropped with *Brachiaria decumbens* in the Brazilian Cerrado. **Plants**, v. 13, n. 6, p. 835, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13060835>

SOUZA JÚNIOR, C. M., et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>

STEVENSON, F. J. Geochemistry of Soil Humic Substances. In: AIKEN, George R. (ed.). **Humic substances in soil, sediment, and water: geochemistry, isolation, and characterization**. United States of America: Wiley, 1985. Cap. 2. p. 1-692.

STEVENSON, Frank J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. John Wiley & Sons, 1994.

STUMPF, L. et al. Sistema radicular da *Urochloa brizantha*: desenvolvimento e influência nos atributos de um solo degradado. **Interciência**, v. 41, n. 5, p. 334-339, 2016. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/339/33945552008.pdf>. Acesso em: 07 dez 2023

SWIFT, R. S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, 1996. p.1011-1020, Pt. 3. (Soil Science Society of America Book Series, 5).

SWOBODA, P.; DÖRING, T. F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: a review. **Science of the Total Environment**, v. 807, p. 150976, fev. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>

TAVARES, L. F. et al. Nutrients release from powder phonolite mediated by bioweathering actions. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 7, n. 2, p. 89-98, 31 jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0194-x>

TAVARES, P. A. et al. Exploring the role of deforestation and cropland expansion in driving a fire-transition in the Brazilian Amazon. **Land**, v. 11, n. 12, p. 2274, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11122274>.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Brasília: Embrapa, 2017.

THEODORO, S. H. et al. Soil remineralization and recovery of degraded areas: An experience in the tropical region. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 107, n. 103014, p. 103014, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103014>

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of soil science*, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

USDA - United States Department of Agriculture. Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 51 Version 2. 2014.

USTINOVA, E. Brazil agriculture seeks remedies for potential fertilizer disruptions. USDA, 2022. Disponível em: [https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Brazil%20Agriculture%20Seeks%20Remedies%20for%20Potential%20Fertilizer%20Disruptions\\_Brasilia\\_Brazil\\_BR2022-0017.pdf](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Brazil%20Agriculture%20Seeks%20Remedies%20for%20Potential%20Fertilizer%20Disruptions_Brasilia_Brazil_BR2022-0017.pdf). Acesso em: 27 nov. 2023.

VALLE, C. B. et al. BRS Paiaguás: A new *Brachiaria (Urochloa)* cultivar for tropical pastures in Brazil. v.1. 2013. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/94373/1/Valle-et-al.-706-rp.pdf>. Acesso em: 05 dez 2023.

VAN STRAATEN, P. **Agrogeology**: The Use of Rock for Crops. 2007. Enviroquest Ltd., p. 440.

VAN STRAATEN, P. et al. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 78, n. 4, p. 731-747, dez. 2006. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000400009>

VICCA, S. et al. Is the climate change mitigation effect of enhanced silicate weathering governed by biological processes? **Global Change Biology**, v. 28, n. 3, p. 711-726, 19 nov. 2021. DOI: [10.1111/gcb.15993](https://doi.org/10.1111/gcb.15993)

VIEIRA, R. M. DA S. P. et al. Land degradation mapping in the MATOPIBA region (Brazil) using remote sensing data and decision-tree analysis. *The Science of the total environment*, v. 782, n. 146900, p. 146900, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146900>

WANG, B. et al. The accumulation of microbial necromass carbon from litter to mineral soil and its contribution to soil organic carbon sequestration. **Catena**, v. 207, p. 105622, dez. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2021.105622>

WANG, C.; KUZUYAKOV, Y. Soil organic matter priming: The pH effects. **Global Change Biology**, v. 30, n. 6, p. e17349, 2024.

WENDLING, B. *et al.* Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Biosci. J.**, v. 28, 2012.

WIENHOLD, B. J. et al. Carbon Source Quality and Placement Effects on Soil Organic Carbon Status. **Bioenergy Research**, v. 6, n. 2, p. 786-796, 1 fev. 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s12155-013-9301-z>

WILD, B.; GERRITS, R.; BONNEVILLE, S. The contribution of living organisms to rock weathering in the critical zone. **Npj Materials Degradation**, v. 6, n. 1, p. 1-16, 20 dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00312-7>

WORLD BANK. Brazil fertilizers, mineral or Chemical; potassic; potassium chloride imports by country in 2022. World Integrated Trade Solution. Disponível em: <https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/BRA/year/2022/tradeflow/Imports/partner/ALL/product/310420>. Acesso em: 27 nov. 2023.

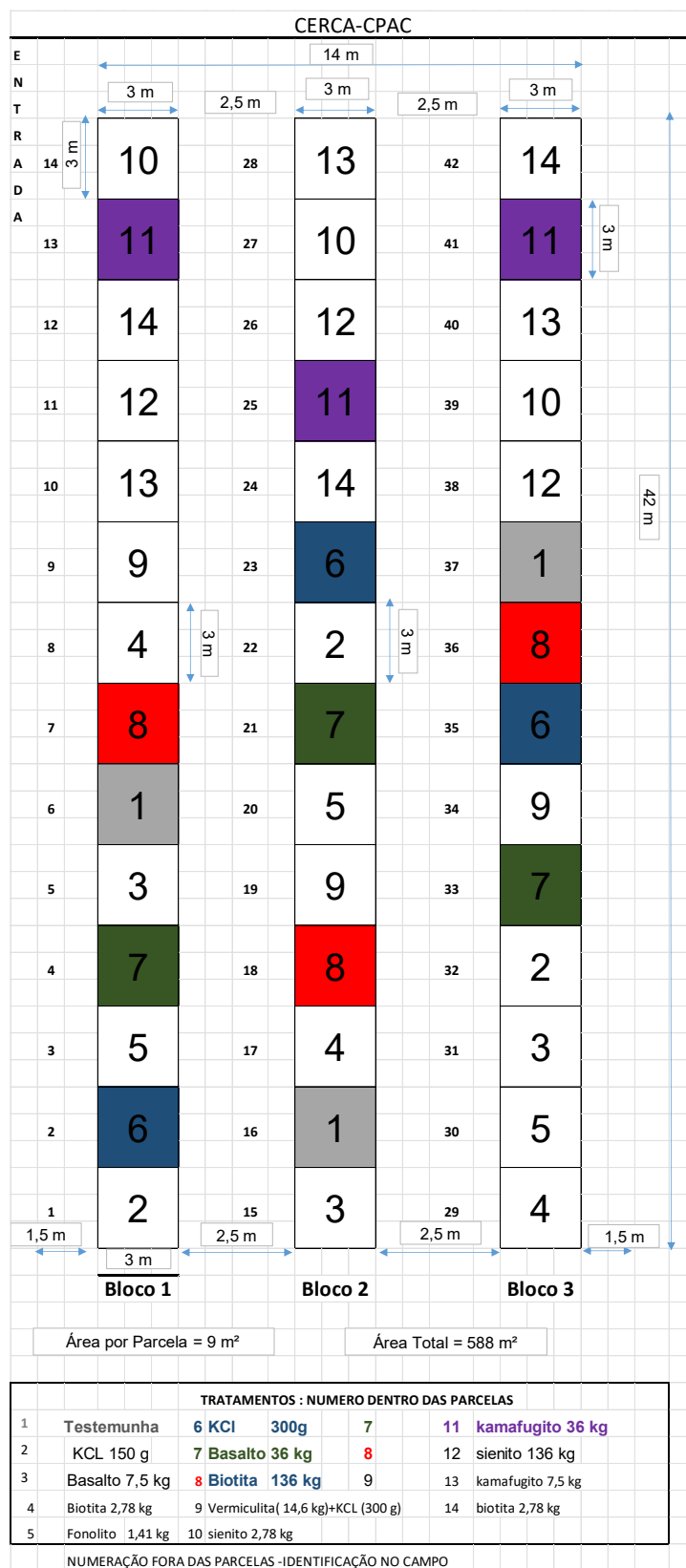
YODER, R. E. Direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of the American Society of Agronomy**, v. 28, n. 5, 1936.

ZEFERINO, L. B. et al. Soil carbon and nitrogen stocks following forest conversion to long-term pasture in Amazon rainforest-Cerrado transition environment. **Catena**, v. 231, p. 107346, out. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2023.107346>

ZHANG, G. et al. Review and outlook for agromineral research in agriculture and climate mitigation. **Soil Research**, v. 56, n. 2, p. 113, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR17157>

ZHANG, S. et al. Global CO<sub>2</sub> consumption by silicate rock chemical weathering: Its past and future. **Earth's future**, v. 9, n. 5, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020EF001938>

## ANEXOS



**Figura 1A-** Desenho da área experimental com destaque para os tratamentos avaliados.  
**Fonte:** João Paulo Guimarães Soares, adaptado por Ewerton Gonçalves de Abrantes.