

**UFRRJ**

**PRÓ-REITORIA DE EXTENSÃO  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO,  
LEVANTAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE SOLOS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**Características Físico-Hídricas de um Argissolo no  
Cerrado Maranhense Sob Diferentes Manejos**

**Carlos Augusto Rocha de Moraes Rego**

**2025**



ESPECIALIZAÇÃO  
Geoprocessamento, levantamento e  
interpretação de solos  
UFRRJ - UFPA - UFV - UFPA





**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**PRÓ-REITORIA DE EXTENSÃO**  
**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO,**  
**LEVANTAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE SOLOS**

**CARACTERÍSTICAS FÍSICO-HÍDRICAS DE UM ARGISSOLO NO**  
**CERRADO MARANHENSE SOB DIFERENTES MANEJOS**

**CARLOS AUGUSTO ROCHA DE MORAES REGO**

*Sob a Supervisão do(a) Professor(a)*  
**Eduardo Carvalho Silva Neto**

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido como requisito parcial para  
obtenção do título de **Especialista** em  
Geoprocessamento, Levantamento e  
Interpretação de Solos.

Seropédica, RJ  
Mês de 2025



ESPECIALIZAÇÃO  
Geoprocessamento, levantamento e  
interpretação de solos

UFRRJ - UFPA - UFV - UFPA



Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada  
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Mor

Rocha de Moraes Rêgo, Carlos Augusto, 1992-  
Características Físico-Hídricas de um Argissolo no  
Cerrado Maranhense Sob Diferentes Manejos / Carlos  
Augusto Rocha de Moraes Rêgo. - São Luís, 2025.  
28 f.

Orientador: Eduardo Carvalho Silva Neto.  
Trabalho de conclusão de curso (Graduação). --  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro,  
Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e  
Interpretação de Solos, 2025.

1. Atributos físicos do solo. I. Silva Neto,  
Eduardo Carvalho, 22/12/1990-, orient. II  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.  
Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e  
Interpretação de Solos III. Título.

**O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de  
Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001**

É permitida a cópia parcial ou total deste documento, desde que seja citada a fonte.

## RESUMO

De Moraes Rego, Carlos Augusto Rocha. **Características físico-hídricas de um argissolo no cerrado maranhense sob diferentes manejos**. 2025. 28. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos). Pró-reitoria de Extensão, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

A expansão da agricultura no bioma Cerrado, especialmente em regiões como o Maranhão, tem impulsionado o uso intensivo do solo, promovendo alterações significativas em suas propriedades físicas e hídricas. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes sistemas de manejo sobre os atributos físico-hídricos de um Argissolo Amarelo Distrocoeso. Foram analisadas três áreas com distintos usos: vegetação de Cerrado nativo (CN), pastagem perene (PP) e sistema de Integração Lavoura-Pecuária (ILP), situadas na Fazenda Barbosa, no município de Brejo-MA. A metodologia incluiu a coleta de amostras deformadas e indeformadas nas camadas de 0–0,05 m e 0,05–0,10 m, com posterior análise da estabilidade dos agregados (via úmida), atributos físicos (densidade, porosidade, resistência à penetração) e curva de retenção de água, utilizando o modelo de Van Genuchten. A análise estatística baseou-se na técnica de Componentes Principais (PCA) e em estatística descritiva simples, permitindo observar a interação entre os atributos estudados e a diferenciação entre os manejos. Os resultados revelaram que o sistema ILP apresentou a maior capacidade de retenção de água disponível para as plantas, refletida por maiores valores de porosidade total, menor densidade do solo e melhor desempenho nos parâmetros da curva de retenção. A ILP também se destacou pelo maior índice S ( $>0,05$ ), indicador de boa estrutura física. Por outro lado, a estabilidade estrutural dos agregados foi inferior, com predominância de microagregados, o que pode ser atribuído ao revolvimento mecânico e ao histórico de cultivo intensivo. O Cerrado nativo apresentou a melhor qualidade estrutural, com alta estabilidade dos agregados, maior proporção de macroagregados e menores valores de resistência à penetração, mas com menor disponibilidade hídrica, evidenciada pela maior retenção de água em microporos de difícil extração. Já a pastagem perene apresentou os piores indicadores físicos: alta compactação, elevado teor de água retida em microporos, menor capacidade de água disponível e menor índice S, revelando acentuada degradação estrutural, provavelmente provocada pelo pisoteio animal e pela ausência de práticas conservacionistas. A curva de retenção de água indicou que os sistemas conservacionistas, como o ILP, favorecem uma maior presença de macroporos e uma transição mais eficiente entre os estados de saturação e murcha, enquanto áreas degradadas ou sob manejo inadequado apresentam acúmulo de microporos, comprometendo tanto a drenagem quanto a disponibilidade de água às plantas. Conclui-se que o sistema ILP representa uma alternativa viável e sustentável para o uso agrícola do Cerrado maranhense, promovendo melhorias significativas na retenção e disponibilidade de água, apesar de requerer atenção quanto à manutenção da estrutura dos agregados. A vegetação nativa continua sendo um referencial de estrutura preservada, embora apresente limitações hídricas. Já a pastagem, quando mal manejada, compromete severamente a qualidade física e funcional do solo. Esses achados reforçam a importância do manejo integrado e da adoção de práticas conservacionistas para a sustentabilidade agrícola em ambientes de alta vulnerabilidade estrutural, como os solos do Cerrado.

**Palavras-chave:** Qualidade do solo. Manejo sustentável. Retenção de água. Integração lavoura-pecuária. Agregação do solo.

## ABSTRACT

De Moraes Rego, Carlos Augusto Rocha. **Physical-hydric characteristics of an argisol in the maranhão cerrado under different management practices**. 2025. 28. Trabalho de Conclusão de Curso (Specialization in Geoprocessing, Soil Survey and Interpretation) Pró-reitoria de Extensão, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

The expansion of agriculture in the Cerrado biome, especially in regions such as Maranhão, has driven intensive land use, leading to significant changes in its physical and water-related properties. This study aimed to evaluate the effects of different management systems on the physical-hydric attributes of a Dystrophic Yellow Argisol. Three areas with distinct land uses were analyzed: native Cerrado vegetation (NC), perennial pasture (PP), and Crop-Livestock Integration system (CLI), located at Fazenda Barbosa, in the municipality of Brejo-MA. The methodology included collecting disturbed and undisturbed soil samples at depths of 0–0.05 m and 0.05–0.10 m, followed by analysis of aggregate stability (wet-sieving method), physical attributes (bulk density, porosity, penetration resistance), and water retention curve using the Van Genuchten model. Statistical analysis was based on Principal Component Analysis (PCA) and simple descriptive statistics, allowing for the observation of interactions among the studied attributes and differentiation between management practices. The results showed that the CLI system had the highest available water retention capacity for plants, reflected by higher total porosity, lower soil bulk density, and better performance in water retention curve parameters. CLI also stood out for its higher S index ( $>0.05$ ), an indicator of good physical structure. However, aggregate structural stability was lower, with a predominance of microaggregates, likely due to mechanical disturbance and a history of intensive cultivation. Native Cerrado vegetation exhibited the best structural quality, with high aggregate stability, a greater proportion of macroaggregates, and lower penetration resistance values, but with lower water availability, evidenced by greater retention in hard-to-extract micropores. Perennial pasture, on the other hand, showed the worst physical indicators: high compaction, elevated water content in micropores, lower available water capacity, and a lower S index, revealing significant structural degradation, probably caused by animal trampling and lack of conservation practices. The water retention curve indicated that conservation systems, such as CLI, promote a greater presence of macropores and a more efficient transition between saturation and wilting states, while degraded or poorly managed areas show micropore accumulation, impairing both drainage and plant water availability. It is concluded that the CLI system represents a viable and sustainable alternative for agricultural use in the Cerrado of Maranhão, promoting significant improvements in water retention and availability, although it requires attention to aggregate structure maintenance. Native vegetation remains a benchmark for preserved structure, albeit with water limitations. Poorly managed pastures, however, severely compromise the physical and functional quality of the soil. These findings reinforce the importance of integrated management and the adoption of conservation practices for agricultural sustainability in structurally vulnerable environments such as Cerrado soils.

**Keywords:** Soil quality. Sustainable management. Water retention. Crop-livestock integration. Soil aggregation.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	3
2.1. <i>Solos do Cerrado Maranhense</i> .....	3
2.2. <i>Atributos físicos do solo</i> .....	4
2.3. <i>Agregação do solo</i> .....	5
2.4. <i>Curva de retenção de água no solo</i> .....	6
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	9
3.1. <i>Descrição do local de estudo</i> .....	9
3.2. <i>Seleção, avaliação e histórico das áreas de estudo</i> .....	9
3.3. <i>Coleta das amostras</i> .....	11
3.4. <i>Determinação da estabilidade dos agregados</i> .....	11
3.5. <i>Determinação dos atributos físicos do solo</i> .....	12
3.6. <i>Determinação da curva de retenção de água no solo</i> .....	12
3.7. <i>Análise estatística</i> .....	13
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	14
4.1. <i>Atributos físicos e Agregados do solo</i> .....	14
4.2. <i>Curva de retenção e Parâmetros físicos-hídricos do solo</i> .....	16
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	20
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	21



## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil consolidou-se como um dos principais exportadores de commodities agrícolas, impulsionado pela expansão e fortalecimento da agricultura no bioma Cerrado (Rada, 2013; Sousa et al., 2021). Nas últimas décadas, essa região tornou-se um polo estratégico de produção de alimentos, energia e fibras (Winkler et al., 2021; Oliveira et al., 2024). No entanto, a intensificação das atividades agrícolas e pecuárias tem contribuído significativamente para o avanço do desmatamento, resultando em impactos ambientais relevantes, como a degradação do solo e a perda de biodiversidade (Winkler et al., 2021; Pinto et al., 2022).

Dentre os principais fatores de impacto, destaca-se o preparo intensivo do solo, considerado uma das intervenções antrópicas mais agressivas à sua estrutura física. Essa prática compromete diretamente a agregação, a porosidade e a movimentação de água e ar no perfil do solo, propriedades essenciais para o bom funcionamento dos processos edáficos, o desenvolvimento radicular e a produtividade das culturas (Mondal; Chakraborty, 2022). O solo, por sua vez, é um ecossistema dinâmico e multifacetado, resultado da interação entre propriedades físicas, químicas e biológicas (Liu et al., 2025). Quando submetido à degradação física, observa-se prejuízo em processos fundamentais, como a disponibilidade de água e nutrientes, a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) e a atividade microbiana (Parihar et al., 2020; Pessoa et al., 2024).

No Cerrado, os solos com textura arenosa predominante apresentam elevada vulnerabilidade à degradação estrutural, baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, rápida decomposição da MOS e elevadas perdas por lixiviação. Esses fatores comprometem a fertilidade natural do solo e aumentam o risco de contaminação dos lençóis freáticos (Salviano et al., 2017; Huang; Hartemink, 2020; Medeiros et al., 2023; Silva et al., 2025).

Diante dessas limitações, práticas conservacionistas como o plantio direto e a manutenção da cobertura vegetal tornam-se fundamentais para garantir a sustentabilidade da agricultura sobre solos arenosos (Bonetti et al., 2017; Fernandes et al., 2023). Tais estratégias favorecem a ciclagem de nutrientes, minimizam o revolvimento do solo e promovem a formação e estabilização de agregados, resultando em melhorias significativas na estrutura física e na capacidade de retenção hídrica. Assim, o aumento da produtividade agrícola sem a necessidade de expandir novas fronteiras agrícolas depende diretamente do uso racional dos recursos naturais e da redução das perdas por erosão (Silva et al., 2021).

Entre as alternativas mais promissoras para o uso sustentável do solo no Cerrado, destacam-se os sistemas integrados de produção, como a Integração Lavoura-Pecuária (ILP). De acordo com Oliveira et al. (2024), esses sistemas contribuem para a redução da pegada ambiental da agropecuária, promovendo melhorias na saúde do solo, na produtividade vegetal e animal, além de desempenharem papel relevante na mitigação das mudanças climáticas e na recuperação de áreas degradadas.

Diversos estudos demonstram que práticas como a diversificação de culturas, o uso de plantas de cobertura e o plantio direto contribuem para o aumento da estabilidade dos agregados, da proporção de macroagregados e dos teores de carbono e nitrogênio no solo



(Locatelli et al., 2025). Após vários anos de adoção do sistema de plantio direto, têm sido observadas melhorias significativas na agregação e na porosidade do solo, com estruturas semelhantes às de áreas sob vegetação nativa e superiores às encontradas em áreas com manejo convencional (Silva et al., 2021). Da mesma forma, pastagens bem manejadas favorecem a agregação e a estabilidade estrutural nas camadas superficiais do solo (Ghosh et al., 2025).

Em contrapartida, o manejo convencional intensificado pode comprometer gravemente a qualidade física do solo, provocando compactação, desagregação, redução da cobertura vegetal e baixa incorporação de matéria orgânica (Souza et al., 2024). Barbosa et al. (2024) relataram que a remoção contínua da palhada reduziu significativamente a biomassa radicular da cana-de-açúcar (23–33%), impactando negativamente o armazenamento de carbono e a estrutura do solo.

A degradação estrutural do solo é um processo multifatorial e complexo, o que reforça a necessidade de identificar atributos físicos sensíveis que atuem como indicadores eficazes da qualidade do solo (Guo et al., 2020; Xu et al., 2024). A estabilidade dos agregados, por exemplo, está diretamente relacionada à retenção e infiltração de água, porosidade, condutividade hidráulica, resistência à compactação e à erosão (Cheng et al., 2015; Pinto et al., 2022; Andrade et al., 2025). Nesse sentido, a caracterização da curva de retenção de água no solo representa uma ferramenta essencial para compreender o comportamento hídrico em condições saturadas e não saturadas, sendo amplamente utilizada em estudos hidrológicos, agrícolas, ecológicos e geotécnicos (Fouad et al., 2025).

Compreender as interações entre os atributos físico-hídricos e as práticas de manejo adotadas é indispensável para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais resilientes e sustentáveis. Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo avaliar os efeitos de diferentes sistemas de manejo sobre os atributos físico-hídricos de um Argissolo Amarelo Distrocoeso. A análise busca identificar alterações nas propriedades estruturais e hidráulicas do solo em função do uso da terra, oferecendo subsídios para práticas que favoreçam a conservação dos recursos edáficos e o aumento da eficiência produtiva na região.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Solos do Cerrado Maranhense

As savanas tropicais são atualmente reconhecidas como ecossistemas ecológica e funcionalmente singulares, distribuídas majoritariamente nos continentes africano, australiano e sul-americano. Juntas, essas formações vegetais abrangem cerca de um sexto da superfície terrestre e respondem por aproximadamente 30% da produtividade primária global da vegetação terrestre, desempenhando um papel essencial na manutenção de serviços ecossistêmicos em escala local e planetária (Williams et al., 2022).

No Brasil, destaca-se o bioma Cerrado, que constitui o segundo maior domínio fitogeográfico do país, com área aproximada de 2.036.448 km<sup>2</sup>, correspondendo a cerca de 24% do território nacional (Rada, 2013). Este bioma está concentrado principalmente no Planalto Central, distribuindo-se pelos estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Bahia, Maranhão, Piauí, Rondônia, São Paulo, Paraná e pelo Distrito Federal (Lima, 2021). No estado do Maranhão, o Cerrado ocupa aproximadamente 65% da superfície estadual (IBGE, 2023).

Historicamente, até a década de 1950, as áreas de Cerrado mantiveram-se relativamente preservadas em termos de uso agrícola. Entretanto, a partir das décadas subsequentes, houve uma intensificação expressiva da conversão dessas áreas para fins agropecuários (Sano, 2011; Tisott; Schmidt, 2021). No contexto maranhense, o Cerrado integra a região conhecida como MATOPIBA, acrônimo que designa os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, consolidada oficialmente por meio do Decreto nº 8.447/2015, abrangendo aproximadamente 73 milhões de hectares direcionados à produção agropecuária (Lima, 2021).

Os principais tipos de solos encontrados no Cerrado maranhense incluem Latossolos (32,96%), Plintossolos (19,16%), Argissolos (18,96%) e Neossolos Quartzarênicos (17,31%) (Aguiar et al., 2010). Esses solos, originados majoritariamente de rochas sedimentares detríticas, são intensamente intemperizados e apresentam textura predominantemente franca a arenosa, elevada proporção de areia fina, teores de silte entre 15% e 20% e baixos índices de argila (10% a 15%). Os solos predominantes nessa região são caracterizados por baixa fertilidade natural, teores reduzidos de matéria orgânica, baixos níveis de cátions trocáveis e presença elevada de óxidos de ferro e alumínio, limitada retenção hídrica e elevada suscetibilidade à erosão (Moura et al., 2008; Sotta et al., 2021; Barbosa et al., 2022).

A intensificação das atividades agrícolas, especialmente o uso contínuo de fertilizantes químicos, maquinários pesados, irrigação inadequada e cultivos extensivos, tem acarretado impactos adversos significativos sobre a qualidade física dos solos (Pinto et al., 2022; Souza et al., 2024). O manejo convencional, baseado no monocultivo, contribui para a degradação da estrutura do solo, aumento da compactação, redução da biodiversidade edáfica e elevação da erodibilidade, comprometendo assim a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Barbosa et al., 2024).

A qualidade física do solo é determinada por atributos como densidade aparente, porosidade total, resistência à penetração e capacidade de retenção de água. Tais parâmetros são fundamentais para o adequado desenvolvimento das plantas, influenciando diretamente



processos como a infiltração de água, a aeração do solo e a disponibilidade de nutrientes (Barbosa et al., 2022). Alterações nesses atributos podem comprometer a produtividade agrícola e a resiliência dos agroecossistemas.

A estrutura do solo, por sua vez, é altamente sensível às intervenções antrópicas. As operações agrícolas intensivas podem degradar os agregados e a porosidade, reduzindo a infiltração de água e aumentando a suscetibilidade à erosão (Melloni et al., 2008). Tais alterações afetam a dinâmica dos processos biológicos e geoquímicos essenciais à manutenção da fertilidade e ao equilíbrio do ecossistema solo.

O monitoramento sistemático dos atributos físicos do solo é indispensável para o planejamento de práticas de manejo conservacionistas (Oliveira et al., 2023). Estratégias como a rotação e diversificação de culturas, sistemas agroflorestais, plantio direto e técnicas específicas de conservação do solo têm demonstrado resultados positivos na recuperação e manutenção da qualidade física do solo (Oliveira et al., 2023; Barbosa et al., 2024). Tais práticas tendem a promover o aumento da matéria orgânica, favorecem a retenção de água e nutrientes e conferem maior resistência à compactação, contribuindo para a sustentabilidade da produção agrícola na região do Cerrado maranhense.

## 2.2. Atributos físicos do solo

Os sistemas de manejo agrícola exercem papel determinante na modificação das propriedades físicas do solo, impactando diretamente sua estrutura, funcionalidade e capacidade de sustentar processos ecológicos e produtivos. Tais propriedades físicas são amplamente reconhecidas como indicadores sensíveis da qualidade e integridade do ambiente edáfico, refletindo não apenas o estado atual do solo, mas também seu histórico de uso e manejo (Souza et al., 2021). A análise criteriosa desses atributos permite não apenas a comparação entre classes de solos distintas, mas também a detecção de alterações sutis em solos de mesma origem taxonômica, decorrentes de práticas agrícolas ao longo do tempo.

Entre os principais atributos físicos afetados pelas intervenções antrópicas no solo destacam-se a densidade aparente, a porosidade total, a distribuição entre macro e microporos e a resistência mecânica à penetração (Michelon et al., 2023; Silveira et al., 2023; Oliveira et al., 2023). Tais características influenciam diretamente processos essenciais ao desenvolvimento vegetal, como a emergência de plântulas, a infiltração e retenção de água, a aeração do sistema radicular e a mobilidade de nutrientes no perfil do solo.

A densidade do solo ( $D_s$ ), expressa em megagramas por metro cúbico ( $Mg\ m^{-3}$ ), representa a razão entre a massa de sólidos e o volume total do solo, sendo um parâmetro fundamental para se avaliar o grau de compactação. Valores elevados de  $D_s$  indicam uma compactação acentuada, o que tende a restringir o desenvolvimento radicular, reduzir a difusão de gases e dificultar a percolação de água, comprometendo significativamente o funcionamento do solo como meio físico e biológico (Michelon et al., 2023). A densidade aparente está fortemente associada à estrutura física do solo, à granulometria dos constituintes, ao grau de porosidade e à resistência mecânica imposta às raízes (Ramos et al., 2017; Richart et al., 2005). Práticas agrícolas que envolvem o preparo convencional do solo e o tráfego intenso de



maquinário contribuem para o incremento da densidade, resultando em degradação estrutural e redução da produtividade.

Outro atributo de destaque é a porosidade total, que corresponde ao volume de espaços vazios presentes entre as partículas sólidas do solo. Esses poros são essenciais para o armazenamento e movimentação de água, bem como para a troca de gases entre o solo e a atmosfera. A estrutura porosa divide-se funcionalmente em macroporos e microporos: os primeiros favorecem a drenagem e aeração, enquanto os segundos retêm a água disponível para as plantas (Michelon et al., 2023). Solos com boa estrutura física tendem a apresentar distribuição equilibrada entre macro e microporos, conferindo maior estabilidade e funcionalidade ao ambiente edáfico (Ribeiro et al., 2007).

A macroporosidade, de maneira particular, está intimamente ligada à taxa de infiltração de água no solo e é altamente sensível às práticas de preparo e compactação (Rezende, 2020). A microporosidade, por sua vez, relaciona-se principalmente com as frações mais finas da textura, como argila e areia fina, determinando a capacidade do solo em reter água (Michelon et al., 2023). Contudo, quando excessiva, pode comprometer a drenagem, tornando o solo suscetível à saturação e à anóxia. Solos com predominância de microporos geralmente apresentam maior retenção hídrica, porém menor taxa de percolação (Ribeiro et al., 2007).

A resistência do solo à penetração, outro parâmetro crítico, mede a força necessária para que raízes ou instrumentos mecânicos penetrem o perfil do solo. Solos com alta resistência impõem barreiras físicas ao crescimento radicular, restringindo a absorção de água e nutrientes, enquanto valores mais baixos favorecem o desenvolvimento profundo das raízes e a exploração eficiente do volume edáfico (Richart et al., 2005). Esse atributo é influenciado, sobretudo, pela densidade do solo e pelo teor de umidade no momento da medição. O uso intensivo de máquinas, especialmente sem o controle do tráfego, é um dos principais fatores associados ao aumento da resistência à penetração (Costa, 2016). De acordo com Blainski et al. (2008), no contexto brasileiro, valores superiores a 2,0 MPa são considerados limitantes ao crescimento radicular, podendo comprometer a produtividade das culturas e acarretar prejuízos econômicos significativos.

Dessa forma, o monitoramento contínuo dos atributos físicos do solo se configura como ferramenta essencial para o diagnóstico de degradação estrutural e para a formulação de estratégias de manejo sustentável, visando à manutenção da capacidade produtiva e à conservação dos recursos naturais.

### **2.3. Agregação do solo**

A agregação do solo constitui um processo fundamental para a manutenção da qualidade física e funcional do ambiente edáfico, influenciando diretamente atributos como a porosidade, a infiltração de água, a resistência à erosão hídrica e o desenvolvimento radicular. Os agregados correspondem a unidades estruturais secundárias formadas pela coesão entre partículas minerais, como areia, silte e argila, e materiais orgânicos, sendo estabilizados por agentes cimentantes, tais como argilas dispersas, óxidos de ferro e alumínio, carbonatos e substâncias húmicas de origem biológica (Tisdall; Oades, 1982; Lima; Kaiser, 2023).



Essas estruturas agregadas representam a base da arquitetura do solo, podendo variar amplamente em tamanho, forma e grau de estabilidade. A formação dos agregados ocorre em etapas hierárquicas: inicialmente, partículas primárias se organizam em microagregados ( $< 250 \mu\text{m}$ ), os quais, por sua vez, podem se agrupar em macroagregados ( $> 250 \mu\text{m}$ ), processo amplamente mediado pela atividade da fauna edáfica, especialmente por organismos da macrofauna e microfauna, além da ação de exsudatos radiculares e microrganismos do solo (Six; Paustian, 2014; Yudina; Kuzyakov, 2019; Lavelle et al., 2020).

A estabilidade dos agregados frente a forças físicas, como o impacto da chuva ou o revolvimento mecânico, é considerada um dos mais relevantes indicadores da resistência estrutural e da resiliência do solo frente a processos de degradação (Lima; Kaiser, 2023). Para mensuração dessa estabilidade, utilizam-se parâmetros como o Diâmetro Médio Ponderado (DMP) e o Diâmetro Médio Geométrico (DMG), sendo que valores elevados para ambos os índices indicam uma estrutura mais robusta e resistente à desagregação (Kemper; Rosenau, 1986; Silva; Mielniczuk, 1997).

Além disso, a proporção relativa entre macroagregados e microagregados serve como importante indicador da condição estrutural do solo. Solos manejados de forma conservacionista tendem a apresentar predominância de macroagregados, o que favorece maior porosidade, melhor infiltração de água e maior capacidade de armazenamento hídrico, promovendo, assim, a melhoria do ambiente radicular e o aumento da produtividade (Guo et al., 2020).

As práticas de manejo adotadas exercem influência direta sobre os processos de formação, estabilização ou degradação dos agregados. Estratégias como a diversificação de culturas, o uso de plantas de cobertura, a adoção do plantio direto e a adição sistemática de resíduos orgânicos ao solo têm se mostrado eficazes na promoção de uma estrutura mais estável e resiliente ao estresse físico (Locatelli et al., 2025). Em contraste, sistemas convencionais, baseados no preparo intensivo e frequente do solo, tendem a romper os agregados, comprometer a estabilidade estrutural, facilitar a formação de crostas superficiais e intensificar a suscetibilidade à erosão e à compactação (Souza et al., 2024).

A agregação e sua estabilidade não apenas refletem a qualidade física do solo, mas também sintetizam os efeitos cumulativos das interações entre clima, organismos do solo, material de origem e práticas de manejo. O monitoramento desses parâmetros torna-se, assim, indispensável para o diagnóstico da saúde do solo e a formulação de estratégias de uso sustentável dos recursos naturais.

#### **2.4. Curva de retenção de água no solo**

A curva de retenção de água no solo (CRAS) representa uma ferramenta essencial na caracterização do comportamento físico-hídrico do solo, estabelecendo a relação funcional entre o teor de umidade e o potencial mátrico (Amorim et al., 2022; Farooq et al., 2024). Essa relação define a energia com que a água é retida em diferentes condições de umidade, permitindo a inferência da disponibilidade hídrica para as plantas em distintos cenários edafoclimáticos (Van Genuchten, 1980; Qi et al., 2018; Amorim et al., 2022). A CRAS tem

ampla aplicabilidade no planejamento de estratégias de irrigação, na formulação de sistemas de manejo agrícola e na avaliação da qualidade física dos solos cultiváveis (Amorim et al., 2022; Farooq et al., 2024).

Três pontos críticos da curva são geralmente considerados na análise: a capacidade de campo (CC), o ponto de murcha permanente (PMP) e a água disponível (CAD) (Farooq et al., 2024). A CC corresponde ao teor de umidade após a drenagem gravitacional, associada geralmente a um potencial mátrico de -10 kPa, refletindo o limite superior da água retida que permanece disponível às plantas. O PMP, por sua vez, corresponde ao limite inferior, próximo de -1500 kPa, a partir do qual a absorção de água pelas raízes torna-se fisiologicamente inviável (Dexter, 2004). A CAD, definida como a diferença entre a CC e o PMP, é considerada a faixa efetiva de água disponível para a absorção radicular, sendo, portanto, um parâmetro crucial para a eficiência do manejo hídrico nas lavouras.

A modelagem da CRAS é geralmente conduzida por meio de equações paramétricas, sendo o modelo proposto por Van Genuchten (1980) o mais amplamente utilizado (Qi et al., 2018; Amorim et al., 2022). Esse modelo incorpora parâmetros como  $\alpha$  (relacionado ao início da drenagem e ao tamanho dos poros),  $n$  (que define a forma da curva e a distribuição poral), e  $\theta_s$  (umidade na condição de saturação). Adicionalmente, o índice  $S$ , proposto por Dexter (2004), quantifica a inclinação da curva no ponto de inflexão, demonstrando sensibilidade à estrutura física do solo. Segundo o autor, valores em torno de 0,035 podem ser utilizados como limite para distinguir solos com boa qualidade estrutural daqueles com qualidade inferior, enquanto valores inferiores a 0,020 indicam solos com péssima qualidade física. Posteriormente, Andrade e Stone (2009) sugeriram que o valor limite mais adequado para essa classificação seria 0,045, diferenciando solos estruturalmente saudáveis daqueles com tendência à degradação, enquanto que valores iguais ou inferiores a 0,025 estariam associados a solos fisicamente degradados.

No contexto do bioma Cerrado, cujos solos são majoritariamente Latossolos e Argissolos, intensamente intemperizados, ácidos, com baixa capacidade de troca catiônica e alta variabilidade textural, a forma da CRAS sofre forte influência da textura e da mineralogia (Qi et al., 2018; Amorim et al., 2022). Solos arenosos, por exemplo, apresentam menor capacidade total de retenção hídrica, porém concentram a maior parte da água retida em faixas próximas à capacidade de campo, tornando essa água mais prontamente disponível às plantas (Amorim et al., 2022; Kaise; Silva, 2023). Por outro lado, solos argilosos retêm maiores volumes totais de água, embora parte expressiva dessa umidade permaneça fortemente retida em potenciais baixos, indisponível ao sistema radicular (Amorim et al., 2022; Kaise; Silva, 2023).

Além da textura, a estrutura física e a matéria orgânica exercem papel determinante sobre o comportamento da CRAS (Kaise; Silva, 2023). Solos manejados sob sistemas conservacionistas, como o plantio direto e a integração lavoura-pecuária (ILP), ou sob vegetação nativa, tendem a apresentar maior macroporosidade, melhor agregação estrutural e maior volume de água disponível, favorecendo o crescimento radicular e o desempenho das culturas (Barbosa et al., 2022). Em contrapartida, áreas sob manejo convencional, especialmente aquelas com pastagens degradadas ou revolvimento excessivo, exibem elevação



da microporosidade, compactação superficial e redução da CAD, comprometendo tanto a infiltração quanto a redistribuição da água no perfil (Barbosa et al., 2022).

A compactação mecânica e o preparo intensivo do solo alteram diretamente a conectividade e a distribuição dos poros, diminuindo a presença de macroporos e redistribuindo a água para compartimentos de baixa condutividade hidráulica (Kaise; Silva, 2023). Tais alterações resultam em menor eficiência do uso da água pelas culturas. Em solos arenosos, a presença de matéria orgânica contribui de forma significativa para a retenção hídrica, devido à sua elevada capacidade de absorção e à promoção da estabilidade dos agregados.

A aplicação de modelos matemáticos de retenção de água, como o de Van Genuchten, em áreas do Cerrado tem demonstrado eficácia, desde que os parâmetros sejam devidamente calibrados com base nas particularidades texturais, estruturais e de manejo de cada localidade (Amorim et al., 2022). Essa abordagem permite simular o comportamento da água no solo com maior precisão, subsidiando decisões quanto ao uso racional dos recursos hídricos, ao desempenho de sistemas irrigados e à resiliência produtiva frente a condições climáticas adversas.

O domínio teórico e prático da CRAS, integrado à caracterização estrutural e física dos solos, configura-se como um instrumento indispensável para o manejo hídrico sustentável. No bioma Cerrado, esse conhecimento é estratégico para otimizar o uso da água, preservar a estrutura do solo e garantir a viabilidade da produção agrícola em um cenário de intensificação do uso da terra e de aumento da variabilidade climática.



### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Descrição do local de estudo

O estudo foi conduzido na Fazenda Barbosa, situada no município de Brejo, Mesorregião leste do Maranhão, Microrregião de Chapadinha, Maranhão, Brasil (latitude 3°42'1.68"S, longitude 42°56'25.15"O e altitude de 100 metros). De acordo com a classificação de Köppen, a região apresenta clima do tipo Aw, tropical quente e úmido, com estação seca no inverno, precipitação média anual entre 1600 e 1900 mm e temperatura média anual superior a 26 °C (Alvares et al., 2014).

O solo da fazenda é classificado como ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso plintossólico, textura arenosa/média/argilosa, A moderado, epiálico, caulínítico, Tmb, hipoférrico, fase cerrado tropical subcaducifólio, relevo plano (Oliveira et al., 2020). Originário de sedimentos arenoargilosos pertence à Formação Barreiras, do período Plio-Pleistoceno (Sousa et al., 2012).

A vegetação predominante é caracterizada como Cerrado tropical subcaducifólio, exibindo uma diversidade florística e uma variedade de formas, incluindo campo cerrado, cerrado ralo, cerrado típico e cerrado denso (IBGE, 2012; Dantas et al., 2014; Oliveira et al., 2020). As espécies mais comuns são Araticum, Sucupira Preta, Murici, Pequi, Faveira, Ipê e Ipê Amarelo. As Palmáceas presentes no município são: Carnaúba, Buriti e Babaçu (Correia Filho, 2011).

#### 3.2. Seleção, avaliação e histórico das áreas de estudo

A Fazenda Barbosa destaca-se por sua abordagem inovadora no uso da terra. Em contraste com os métodos convencionais da região, adota práticas agrícolas diversificadas e voltadas para a conservação ambiental. Dessa forma, para a execução deste estudo foram demarcadas três áreas de interesse: Cerrado nativo (CN), Pastagem perene (PP) e lavoura em sistema de integração lavoura-pecuária (ILP). A seguir, está apresentado a caracterização química e granulométrica das áreas de estudo (Tabela 1) e um breve histórico e descrição das áreas selecionadas:

**Tabela 1** - Caracterização dos atributos químicos e granulométricos da camada arável (0,00-0,10 m) das áreas de estudo localizadas na Fazenda Barbosa, Brejo – MA

Análise Química								
Área	pH (CaCl <sub>2</sub> )	P (meh)	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	MO
		mg dm <sup>-3</sup>			cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			g dm <sup>-3</sup>
ILP	5,21	40,95	0,08	2,28	0,92	0,00	2,30	25,53
CN	4,65	2,68	0,05	1,26	0,61	0,25	2,70	24,14
PP	4,80	18,42	0,05	1,38	0,68	0,23	2,90	23,11

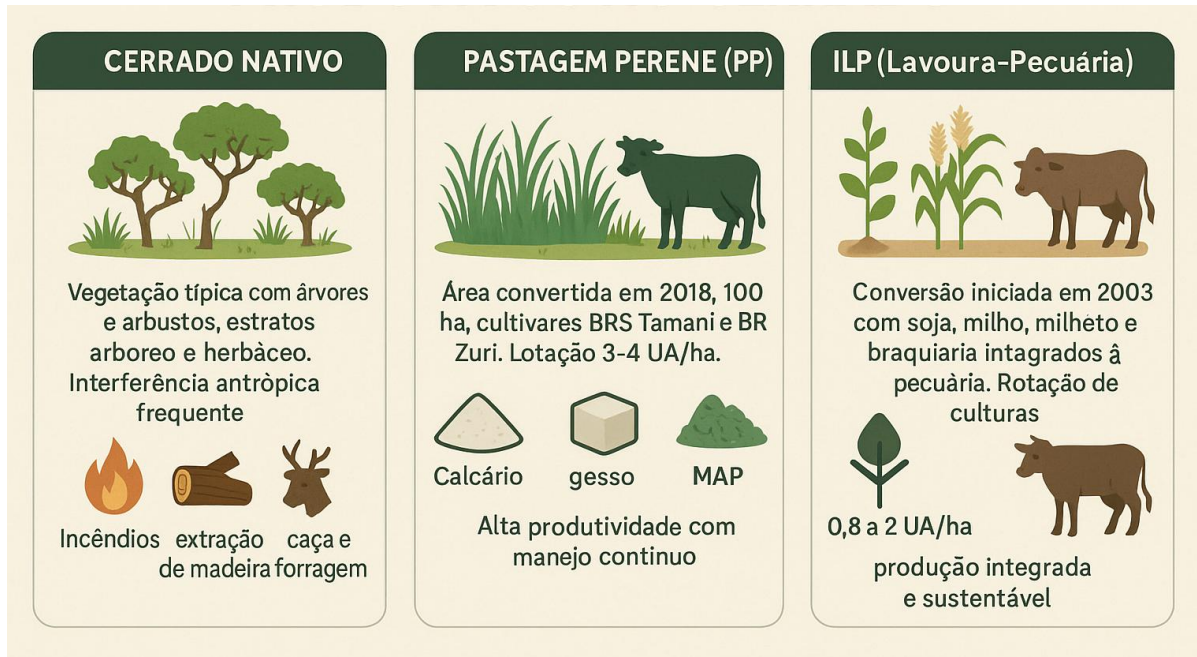
Análise Granulométrica						
Área	Areia	Areia	Areia	Argila	Silte	Classificação textural
	Total	Fina	Grossa			
			%			
ILP	73,16	38,71	34,45	19,83	7,01	Franco argiloso arenoso
CN	82,51	39,53	42,98	14,47	3,02	Franco arenoso
PP	80,78	39,83	40,94	17,65	1,57	Franco arenoso

Nota. ILP: Integração lavoura-pecuária; CN: Cerrado nativo; PP: Pastagem perene; MO: Matéria orgânica. P e K – Extrator Mehlich<sup>-1</sup>; Al, Ca e Mg – Extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; H+Al – pH SMP (7,5).

**Cerrado Nativo (CN):** Vegetação típica do Cerrado sensu stricto com árvores e arbustos distribuídos em dois estratos (arbóreo/arbustivo e herbáceo/gramíneo) (Figura 1). A área sofre interferências antrópicas como incêndios, extração de madeira, produção de brotos para forragem e caça.

**Pastagem Perene (PP):** Área de 100 ha convertida do Cerrado em 2018 para pastagem, com lotação de 3 a 4 UA/ha. Plantio das cultivares BRS Tamani e BRS Zuri, com correção do solo por calcário, gesso e adubação fosfatada inicial. Adubações periódicas a cada três anos e desde 2023 aplicação de varredura de adubo.

**Integração Lavoura-Pecuária (ILP):** Conversão iniciada em 2003 com preparo do solo e plantio de soja, seguida de cultivo alternado de soja, milho, milheto e braquiária, integrados com produção pecuária (0,8 a 2 UA/ha). Correção e adubação do solo são constantes, com aplicações específicas para cada cultura e safra. O sistema mantém rotações e cobertura com braquiária para produção de palhada e manejo sustentável do solo.



**Figura 1** - Esquema visual simplificado dos manejos e breve histórico.

**Fonte:** Próprio Autor, 2025

### 3.3. Coleta das amostras

Em cada sistema de manejo (CN, PP e ILP) foram coletados 21 pontos distribuídos em uma malha amostral de 100 m × 100 m. Onde foram abertas trincheiras com dimensões de 0,25 × 0,20 × 0,10 m (largura × comprimento × altura). Nessas trincheiras, realizou-se a coleta de amostras deformadas e indeformadas nas profundidades de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m. Após a coleta, as amostras foram cuidadosamente acondicionadas em embalagens devidamente identificadas e transportadas até o laboratório de Física e Classificação do Solo da Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências de Chapadinha. Onde passaram pelo processo de secagem ao ar, para posteriormente serem analisadas.

### 3.4. Determinação da estabilidade dos agregados

As amostras de solo indeformadas foram fragmentadas para a obtenção de agregados com diferentes tamanhos, os quais passaram por um conjunto de peneiras com malhas de 8 e 4,0 mm. Dos agregados retidos na peneira de 4,0 mm, pesou-se 50 g e os mesmos foram submetidos a análises de estabilidade dos agregados via úmida.

A estabilidade de agregados via úmida foi obtida distribuindo-se as amostras pesadas na parte superior de um conjunto de peneiras com abertura de 2,00 – 1,00 – 0,50 – 0,25 – 0,15 mm, mais o fundo de peneira. As amostras foram previamente umedecidas até o ponto de friabilidade e acopladas ao agitador com oscilação vertical para o peneiramento em água durante 15 min, a 42 oscilações por minuto (Salton et al., 2017). Posteriormente, o material retido foi cuidadosamente retirado, acondicionado em latas, secos em estufa a 105°C durante 24h e pesados para a determinação da massa seca retida em cada peneira.



De posse dos resultados, determinou-se o diâmetro médio ponderado (DMP) (Kiehl, 1979), diâmetro médio geométrico (DMG) (Kemper; Rosenau, 1986), porcentagem de agregados estáveis na classe  $>2$  mm (Sales et al., 2016) e a porcentagem de macroagregados (MACRO) e de microagregados (MICRO), somando-se a porcentagem de agregados retidos nas classes acima e abaixo de 250  $\mu$ m, respectivamente (Tisdall; Oades, 1982).

### 3.5. Determinação dos atributos físicos do solo

Para a determinação dos atributos físicos do solo nas áreas de estudo (CN, PP e ILP) coletou-se amostras indeformadas aleatoriamente pelo método do anel volumétrico nas profundidades de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m, totalizando 126 unidades. A partir dessas amostras efetuou-se as seguintes análises: densidade do solo ( $D_s$ ), porosidade total ( $P_t$ ), macroporosidade ( $M_a$ ), microporosidade ( $M_i$ ) e umidade gravimétrica ( $U_g$ ), conforme a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017).

Realizou-se in situ a medição da resistência do solo à penetração (RPS) com auxílio de um penetrógrafo eletrônico modelo penetroLOG-Falker-PLG1020 a cada 0,05 m até chegar à profundidade de 0,10 m. A medição foi feita ao lado dos locais de retirada dos anéis volumétricos.

### 3.6. Determinação da curva de retenção de água no solo

A partir de parte das amostras indeformadas coletadas pelo método do anel volumétrico nas profundidades de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m determinou-se a curva de retenção de água no solo. Para tal, as amostras foram preparadas seguindo-se a metodologia descrita por Teixeira e Bhering (2017).

Os potenciais (ou tensões) de 0 kPa foram obtidos pela pesagem das amostras após a saturação por capilaridade. Os potenciais de 6, 10, 30 e 60 kPa foram determinados em mesa de tensão de areia-caolin e as tensões de 100, 300, 500 e 1500 kPa em câmara de Richards (Teixeira; Bhering, 2017). Após atingir o equilíbrio, as amostras foram pesadas em balança de precisão, secas em estufa a 105°C até atingirem peso constante e pesadas novamente para obtenção da umidade correspondente a cada tensão aplicada.

De posse dos resultados, inicialmente determinou-se a capacidade de campo (CC), que corresponde a umidade no potencial de 10 kPa; ponto de murcha permanente (PMP), relacionada a umidade no potencial de 1500 kPa; água facilmente disponível (AFDr), obtida através da subtração da umidade no potencial de 0 kPa pela CC, multiplicada pela espessura da camada do solo desejada; capacidade de água disponível (CAD), obtida pela subtração entre CC-PMP, multiplicada pela camada de solo desejada; e água prontamente disponível (APD), que corresponde a subtração da umidade no potencial de 6 kPa pela umidade no potencial de 100 kPa (Barbosa et al., 2014).

A curva de retenção de água no solo foi ajustada conforme o modelo de Van Genuchten (1980), utilizando-se o software Excel, seguindo-se a equação descrita abaixo:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[(1 + (\alpha\Psi_m)^n]^m}$$

Onde,  $\theta$ : conteúdo volumétrico de água no solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $\theta_r$ : umidade residual do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $\theta_s$ : umidade volumétrica do solo na saturação ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $\Psi_m$ : valor absoluto do potencial matricial (kPa);  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$ : parâmetros empíricos do modelo, sendo  $\alpha$  expresso em  $\text{kPa}^{-1}$  e  $n$ ,  $m$  adimensionais.

Nesse modelo,  $\theta_s$  define a assíntota superior da curva, representando o conteúdo saturado de água no solo, enquanto  $\theta_r$  define a assíntota inferior da curva, representando o conteúdo residual de água no solo; o parâmetro  $n$  é adimensional e reflete a forma da curva, ao tempo em que  $\alpha$  é expresso em  $\text{kPa}^{-1}$  e é afetado pela escala da tensão da água no solo e  $m$  é a restrição de Mualem:  $m = 1 - (1/n)$ . Os parâmetros  $\theta_r$ ,  $n$  e  $\alpha$  foram obtidos por meio da rotina Solver da planilha eletrônica Excel, ao passo que o parâmetro  $q_s$  foi determinado por meio da pesagem direta da amostra do solo saturado.

O índice  $S$  foi determinado pelo ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo, de acordo com Dexter (2004), e restrição de Mualem (1986) que corresponde a:  $1-1/n$ . Segue abaixo a equação utilizada:

$$|S| = -n(\theta_s - \theta_r) \left[ 1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)}$$

Onde,  $|S|$ : valor de inclinação da curva de retenção de água no solo no seu ponto de inflexão em módulo;  $n$ : parâmetro adimensional empírico do modelo;  $\theta_s$ : umidade volumétrica do solo na saturação ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $\theta_r$ : umidade residual do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $m$ : restrição proposta por Mualem (1986).

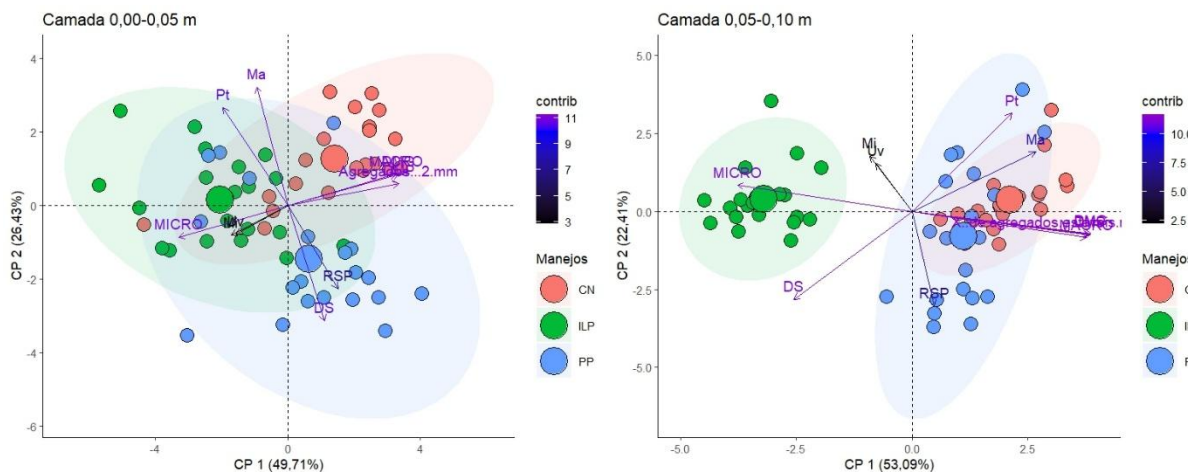
### 3.7. Análise estatística

Os dados referentes à estabilidade de agregados e aos atributos físicos das diferentes áreas foram submetidos à análise multivariada de Componentes Principais, utilizando-se a distância euclidiana como medida de similaridade, com o auxílio do software R, versão 4.0 (R Core Team, 2021). Para a curva de retenção de água no solo e os parâmetros obtidos por meio da equação ajustada, foi determinado o coeficiente de correlação, visando avaliar o grau de ajuste do modelo aos dados experimentais.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Atributos físicos e Agregados do solo

Os dois primeiros componentes principais (PCs) explicaram 76,14% e 75,5% da variância total dos atributos físicos e estruturais do solo nas camadas de 0,00–0,05 m e 0,05–0,10 m, respectivamente, indicando que a maior parte da variabilidade dos dados está bem representada (Figura 2 a, b). O primeiro componente principal (PC1) explicou 49,71% da variância na camada de 0,00–0,05 m e 53,09% na de 0,05–0,10 m, enquanto o segundo componente (PC2) respondeu por 26,43% e 22,41%, respectivamente.



**Figura 2** - Representação biplot CP1 × CP2 sobre as variáveis físicas e agregados em diferentes manejos no cerrado maranhense.

**Fonte:** Próprio Autor, 2025

Na camada de 0,00–0,05 m, o PC1 apresentou correlação muito forte com os principais atributos estruturais do solo, como o diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP,  $r = 0,95$ ), a fração de agregados maiores que 2 mm ( $r = 0,95$ ), o diâmetro médio geométrico dos agregados (DMG,  $r = 0,94$ ), os macroagregados (MACRO,  $r = 0,92$ ) e, inversamente, com os microagregados (MICRO,  $r = -0,92$ ). Isso indica que o PC1 está associado principalmente à qualidade estrutural do solo, refletindo o desenvolvimento de agregados estáveis e maior porosidade funcional. O segundo componente principal (PC2) mostrou correlações fortes a muito fortes com a porosidade total (Pt,  $r = 0,75$ ), a densidade do solo (Ds,  $r = -0,88$ ) e a macroporosidade (Ma,  $r = 0,91$ ), indicando que esse componente está relacionado às propriedades físicas do solo que afetam sua capacidade de armazenamento e movimentação de água e ar.

Na camada de 0,05–0,10 m, observou-se um padrão semelhante ao das camadas superiores: o PC1 manteve correlações muito fortes com o diâmetro médio geométrico dos agregados (DMG,  $r = 0,97$ ), o diâmetro médio ponderado (DMP,  $r = 0,96$ ), a fração de agregados > 2 mm ( $r = 0,96$ ), os macroagregados ( $r = 0,94$ ) e os microagregados ( $r = -0,94$ ), reforçando sua forte associação com a estrutura do solo. Além disso, o PC1 apresentou correlações significativas com a porosidade total (Pt,  $r = 0,79$ ), a densidade do solo (Ds,  $r = -$



0,71) e a resistência do solo à penetração (RSP,  $r = -0,76$ ). Esses resultados indicam que solos com melhor estrutura tendem a apresentar maior porosidade, menor densidade e menor resistência à penetração, condições que favorecem o crescimento radicular e a circulação de água e ar no perfil. De acordo com Pessoa et al. (2024), a qualidade estrutural do solo influencia diretamente diversos processos edáficos, como as trocas gasosas, a infiltração de água, o transporte de solutos, a retenção de umidade e a disponibilidade de água para as plantas.

A análise gráfica por meio do biplot da Análise de CP revelou relações claras entre os atributos físicos e estruturais do solo. As variáveis Macro, DMP, DMG e a fração de agregados com diâmetro superior a 2 mm apresentaram ângulos agudos entre si, indicando forte correlação positiva. Em contrapartida, essas mesmas variáveis formaram ângulos obtusos com MICRO e Mi, padrão que se manteve consistente em ambas as camadas avaliadas.

De forma semelhante, observaram-se ângulos agudos entre os vetores de Pt e Ma, assim como entre Mi e Uv, e entre DS e RSP, evidenciando correlações positivas entre esses pares na camada de 0,00-0,05 m. A variável RSP apresentou ângulos obtusos em relação a Pt e Ma na camada de 0,00–0,05 m e em relação a Mi e Uv na camada de 0,05–0,10 m, indicando correlações negativas nessas associações. Por sua vez, Ds formou ângulo obtuso com Pt e Ma na camada de 0,05–0,10 m.

Por fim, observou-se uma correlação inversa entre RSP e os atributos DMP, DMG e a fração de agregados maiores que 2 mm, reforçando a interpretação de que solos com maior resistência à penetração tendem a apresentar menor qualidade estrutural, refletida na menor formação de agregados estáveis e na redução do volume de porosidade funcional.

Ao analisar a distribuição dos sistemas de uso do solo no plano formado pelas componentes principais, observa-se que, na camada de 0,00–0,05 m, o sistema ILP foi associado negativamente ao PC1, enquanto os sistemas CN e PP apresentaram associação positiva. Considerando que o PC1 está fortemente relacionado aos atributos estruturais do solo, essa distinção indica que o sistema ILP apresenta menor desenvolvimento estrutural em comparação aos sistemas CN e PP. Já na segunda componente principal (PC2), que reflete propriedades físicas como porosidade e densidade, tanto os sistemas CN quanto ILP exibiram forte associação positiva, ao passo que o sistema PP mostrou uma influência negativa.

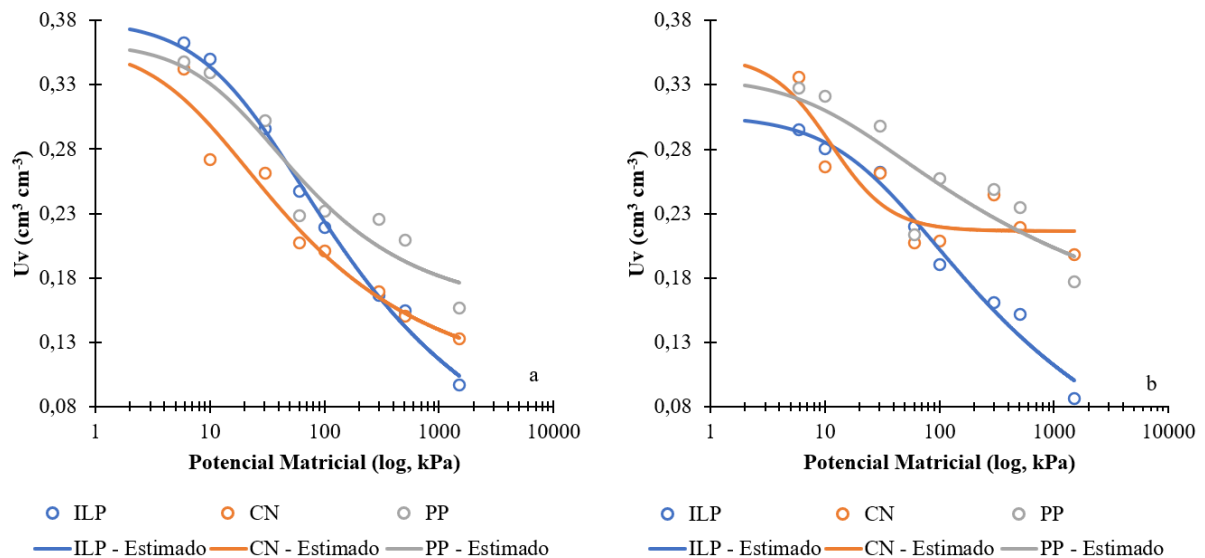
Na camada de 0,05-0,10 m, os padrões de influência dos sistemas de manejo sobre PC1 e PC2 foram semelhantes aos observados na camada superficial, com alterações pontuais nas variáveis que mais contribuíram para cada componente, sugerindo que as diferenças estruturais e físicas entre os sistemas permanecem, embora com intensidade variável em profundidades maiores.

Ao analisar a estrutura do solo, verificou-se que a área ILP apresentou uma predominância de microagregados em comparação às demais áreas, o que exerceu forte influência na separação entre os ambientes analisados. Além disso, a ILP apresentou menores valores nas variáveis associadas ao eixo PC1. Vale destacar que, de modo geral, os macroagregados são mais transitórios e mais suscetíveis à degradação, especialmente em função do preparo do solo, enquanto os microagregados tendem a ser mais estáveis (Mondal; Chakraborty, 2021).

Corroborando os resultados deste estudo, Pessoa et al. (2024) observaram que áreas com alta concentração de microagregados ( $< 0,25$  mm) apresentaram redução no diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados. Esse comportamento pode estar relacionado ao elevado teor de argila dispersível, frequentemente encontrado em solos coesivos, o que compromete a estabilidade dos agregados e aumenta a suscetibilidade a processos erosivos. A presença de argila dispersível favorece a obstrução da porosidade do solo por meio de sua eluviação ao longo do perfil, o que reduz as taxas de infiltração de água (Pessoa et al., 2024; Mota et al., 2018).

#### 4.2. Curva de retenção e Parâmetros físicos-hídricos do solo

Em relação à curva de retenção de água no solo na camada de 0,0–0,05 m, na condição de saturação (0 kPa), o sistema de ILP apresentou o maior teor de água ( $0,380 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), seguido pela PP ( $0,363 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e pelo CN ( $0,361 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) (Figura 3). Este resultado indica maior porosidade total no solo sob ILP, o que é corroborado pelos valores de  $\theta_s$  obtidos na modelagem da curva de retenção (Tabela 2).



**Figura 3** - Curva de retenção hídrica do solo em diferentes manejos e profundidades (0–0,05 m (a) e 0,05–0,10 m (b)) sob múltiplas tensões matriciais.

Fonte: Próprio Autor, 2025

Com o aumento da tensão matricial, observou-se uma redução mais acentuada no teor de água nos sistemas CN e PP, sugerindo maior proporção de microporos instáveis e menor capacidade de retenção. A 10 kPa, o teor de água no CN caiu abruptamente para  $0,271 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , enquanto ILP e PP mantiveram valores mais elevados ( $0,350$  e  $0,339 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , respectivamente), indicando maior capacidade de retenção de água disponível no solo sob ILP.

Em tensões intermediárias (100 - 500 kPa), o teor de água no PP superou o do ILP, o que pode estar associado à maior proporção de microporos formados por compactação

superficial, estruturas que retêm água com maior força, porém com baixa disponibilidade para as plantas.

A 1500 kPa, valor que representa o ponto de murcha permanente (água não disponível às plantas), o solo sob CN apresentou o maior teor de água retida ( $0,132 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), seguido por PP ( $0,157 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), enquanto o ILP registrou o menor valor ( $0,097 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Esse comportamento evidencia que o solo sob ILP disponibiliza maior fração de água às plantas, em virtude da menor retenção em microporos de difícil extração.

Na camada de 0,05–0,10 m, o CN apresentou o maior teor de água na saturação ( $0,353 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), enquanto o ILP registrou o menor ( $0,306 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), possivelmente devido à redistribuição vertical da estrutura do solo. Contudo, entre 10 e 60 kPa, intervalo associado à água prontamente disponível, o ILP manteve teores mais estáveis (entre  $0,281$  e  $0,221 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), enquanto o CN apresentou maior variabilidade e quedas mais acentuadas.

Na tensão de 1500 kPa, os teores de água retida foram novamente maiores em CN ( $0,198 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e PP ( $0,177 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), em comparação ao ILP ( $0,087 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), confirmando a predominância de microporos nos sistemas CN e PP. Embora esses poros aumentem a retenção total de água, reduzem a fração efetivamente disponível para as plantas.

Em relação aos parâmetros estimados pelo modelo de Van Genuchten na camada de 0,00–0,05 m, o sistema ILP apresentou o maior teor de água na saturação ( $\theta_s = 0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e o menor teor de água residual ( $\theta_r = 0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), refletindo elevada porosidade total e baixa retenção de água em microporos (Tabela 2). O valor de  $\alpha$  ( $0,05 \text{ kPa}^{-1}$ ) indica uma menor tensão de entrada de ar, o que, associado ao maior índice S (0,06), evidencia maior presença de macroporos e boa capacidade de drenagem e aeração. O parâmetro n (1,15), relacionado à forma da curva de retenção, sugere uma transição moderadamente abrupta entre os estados de saturação e ressecamento, condizente com solos de melhor estrutura física. O ajuste do modelo foi excelente ( $r^2 = 1,00$ ), conferindo alta confiabilidade aos parâmetros estimados.

**Tabela 2** - Parâmetros de ajuste as curvas de retenção da água no solo em um Argissolo em sobre manejos no cerrado maranhense.

Manejos	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	n	m	$r^2$	Índice S
	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$		$\text{kPa}^{-1}$				
0,00-0,05 m							
ILP	0,38	0,01	0,05	1,15	0,28	1,00	0,06
CN	0,36	0,09	0,13	1,17	0,31	0,97	0,05
PP	0,36	0,15	0,06	1,22	0,40	0,95	0,04
0,05-0,10 m							
ILP	0,31	0,00	0,04	1,13	0,24	0,98	0,05
CN	0,35	0,22	0,09	1,65	1,04	0,88	0,06
PP	0,34	0,12	0,09	1,10	0,19	0,82	0,03

O Cerrado Nativo (CN) apresentou valores intermediários de  $\theta_s$  ( $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e  $\theta_r$  ( $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), com  $\alpha$  mais elevado ( $0,13 \text{ kPa}^{-1}$ ) e n (1,17), o que indica uma maior proporção de mesoporos e uma transição um pouco mais rápida entre as fases de saturação e drenagem em comparação ao ILP. O índice S (0,05) indica uma estrutura física ainda adequada.



Na PP, apesar de apresentar uma capacidade de armazenamento de água máxima semelhante ao CN e próxima a ILP ( $\theta_s = 0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), observou-se um valor elevado de água residual ( $\theta_r = 0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), indicando maior presença de microporos. O valor baixo de  $\alpha$  ( $0,06 \text{ kPa}^{-1}$ ) aliado ao menor índice S (0,04) sugere menor continuidade dos macroporos, refletindo uma estrutura do solo mais compactada e com sinais de degradação. Além disso, o valor de n (1,22) indica uma transição mais abrupta na retenção de água, característica comum em solos compactados ou com alteração estrutural superficial. Essa maior retenção em microporos e a menor conectividade dos poros grandes apontam para compactação superficial do solo, o que pode comprometer a drenagem e a aeração, impactando negativamente o desenvolvimento das raízes.

Na camada de 0,05–0,10 m, o ILP manteve os melhores indicadores de qualidade física, com menor  $\theta_r$  (praticamente nulo),  $\alpha$  de  $0,04 \text{ kPa}^{-1}$  e n de 1,13, caracterizando boa distribuição de poros e transição adequada entre saturação e secagem. O índice S (0,05) reforça essa condição. No CN, o maior valor de  $\theta_r$  ( $0,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), associado ao  $\alpha$  ( $0,09 \text{ kPa}^{-1}$ ) e n (1,65), indica maior retenção de água em microporos e estrutura mais heterogênea, o que se reflete no menor ajuste do modelo ( $r^2 = 0,88$ ). O sistema PP novamente apresentou os piores indicadores na camada subsuperficial, com o menor índice S (0,03),  $\alpha$  baixo ( $0,09 \text{ kPa}^{-1}$ ) e n de 1,10, além de menor  $r^2$  (0,82), indicando maior dispersão dos dados e acentuada degradação estrutural.

Os resultados obtidos para o índice S reforçam sua sensibilidade como indicador da qualidade física do solo. Conforme os critérios de Dexter (2004), valores de S superiores a 0,05 indicam uma estrutura adequada, enquanto valores abaixo de 0,035 caracterizam solos com estrutura degradada. Nesse contexto, o sistema ILP demonstrou maior eficiência na conservação da qualidade física, especialmente quanto aos atributos relacionados à retenção e disponibilidade de água no solo.

Na camada superficial (0,0–0,05 m), o ILP apresentou a maior capacidade de campo ( $CC = 0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e a menor umidade no ponto de murcha permanente ( $PMP = 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), resultando em valor expressivo de água facilmente disponível ( $AFDr = 0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) (Tabela 3). Este desempenho pode ser atribuído à maior diversidade de cobertura vegetal, maior densidade radicular e ciclagem de matéria orgânica, características típicas de sistemas integrados que favorecem melhorias na estrutura do solo.

**Tabela 3** - Parâmetros físicos-hídricos do solo: Capacidade de Campo (CC), Ponto de Murcha Permanente (PMP), água facilmente disponível (AFDr), capacidade de água disponível (CAD) e água prontamente disponível (APD) sob diferentes manejos e profundidades no cerrado maranhense.

Manejos	CC	PMP	AFDr	CAD	APD
	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>				
0,00-0,05 m					
ILP	0,35	0,10	0,15	1,27	0,14
CN	0,27	0,13	0,45	0,70	0,14
PP	0,34	0,16	0,12	0,91	0,12
0,05-0,10 m					
ILP	0,28	0,09	0,13	0,97	0,10
CN	0,27	0,20	0,43	0,35	0,13
PP	0,32	0,18	0,07	0,72	0,07

O sistema de pastagem permanente apresentou menor desempenho, com AFDr de 0,12 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e APD de 0,12 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, além de maior PMP (0,16 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), o que indica maior retenção de água em formas não disponíveis às plantas. O sistema CN, por sua vez, apresentou a menor CC (0,27 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), mas valor de AFDr elevado (0,45 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), o que pode refletir uma estrutura relativamente estável. Contudo, esse valor elevado pode também indicar possíveis inconsistências metodológicas ou influência de microporosidade funcional mais acentuada.

Na camada subsuperficial (0,05–0,10 m), houve redução generalizada nos valores de CC, como esperado, devido à menor atividade biológica e compactação natural. O ILP manteve desempenho satisfatório, com CC de 0,28 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e AFDr de 0,13 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, reforçando a capacidade do manejo integrado em conservar a qualidade física ao longo do perfil. O CN apresentou alto valor de PMP (0,20 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) e a maior AFDr da camada (0,43 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), o que pode refletir presença de microporos ativos ou influência da textura mais argilosa nessa profundidade. A pastagem permanente exibiu os menores valores de AFDr (0,07 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) e APD (0,07 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), configurando-se como o sistema mais limitante quanto à oferta de água às plantas, possivelmente em razão da compactação provocada pelo pisoteio animal e ausência de práticas conservacionistas.



## 5. CONCLUSÕES

O sistema de Integração Lavoura-Pecuária apresentou destaque na melhoria da disponibilidade de água para as plantas, com maiores valores de porosidade e capacidade de armazenamento hídrico. No entanto, apresentou menor estabilidade estrutural dos agregados, refletida pela maior proporção de microagregados.

O Cerrado Nativo, por sua vez, manteve maior estabilidade de agregados e estrutura mais preservada, porém com menor capacidade de retenção de água disponível.

A Pastagem Perene apresentou os piores indicadores físicos, evidenciando compactação, maior retenção de água em microporos e menor disponibilidade hídrica para as plantas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A. C.; BICUDO, S. J.; SOBRINHO, J. R. S. C.; MARTINS, A. L. L.; COELHO, K. P.; MOURA, E. G. Nutrient recycling and physical indicators of alley cropping system ins sandy loam in the pre-Amazon region of Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.86, n.5, p.189-198, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-009-9283-6>
- ALVARES, C. A; STAPE, J. J.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPA-ROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- AMORIM, R.S.S.; ALBUQUERQUE, J. A.; COUTO, E. G.; KUNZ, M.; RODRIGUES, M. F.; SILVA, L. C. M.; REICHERT, J. M. Water retention and availability in Brazilian Cerrado (neotropical savanna) soils under agricultural use: Pedotransfer functions and decision trees. **Soil and Tillage Research**, v. 224, n.10, p. 105485, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105485>
- ANDRADE, M. G. O.; CORDEIRO, C. F. S.; ROBERTO, A. F.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Lime and gypsum reduce N-fertilizer requirements and improve soil physics, fertility and crop yields in a double-cropped system. **Geoderma**, v. 453, n.1, 117132, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117132>
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.4, p.382-388, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000400003>
- BARBOSA, L. C.; TENELLI, S.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; LIMA, R. P.; CASTIONI, G. A. F.; ROSSI NETO, J.; CARVALHO, J. L. N. Linking soil physical quality to shoot and root biomass production in scenarios of sugarcane straw removal. **European Journal of Agronomy**, v. 152, n.1, 127029, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127029>
- BARBOSA, L. R.; SOUZA, H. A.; OLIVEIRA, F. P.; NUNES, L. A. P. L.; LEITE, L. F. C. Physical-hydraulic properties of an aulisol in direct planning and free livestock integration in the cerrado. **Revista Caatinga**, v.35, n.2, p.460-469, 2022. <https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n221rc>
- BARBOSA, S. M.; DE OLIVEIRA, G.C.; CARDUCCI, C. E.; MONTOANI SILVA, B. Potencialidade de uso de zeólitas na atenuação do déficit hídrico em Latossolo do cerrado **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, n. 4, p. 2357-2368, 2014. DOI: <https://10.5433/1679-0359.2014v35n4Suplp2357>

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.3, p.975-983, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300007>

BONETTI, J. A.; ANGHINONI, I.; MORAES, M. T.; FINK, J. R. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. **Soil and Tillage Research**, v. 174, n.12, p. 104-112, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.06.008>

CHENG, M.; XIANG, Y.; XUE, Z.; AN, S.; DARBOUX, F. Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China. **Catena**, v. 124, n.12, p. 77-84, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.006>.

CORREIA FILHO, F. L. **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea: estado do Maranhão: relatório diagnóstico do município de Brejo** / Francisco Lages Correia Filho, Érico Rodrigues Gomes, Ossian Otávio Nunes, José Barbosa Lopes Filho. Teresina: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2011. 31 p. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/15399>. Acesso em: 27/06/2025

COSTA, P. H. S. **Resistência do solo à penetração em diferentes sistemas de uso e manejo de solo**. 2016. 38f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Centro de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Federal do Maranhão, Chapadinha, 2016.

DANTAS, J. S.; MARQUES-JÚNIOR, J.; MARTINS-FILHO, M. V.; RESENDE, J. M. A.; CAMARGO, L. A.; BARBOSA, R. S. Gênese de solos coesos do leste maranhense: relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 38, n. 4, p. 1039-1050, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400001>.

DEXTER, A.R. Soil physical quality part I. Theory, effects, density and organic matter and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>

FAROOQ, U.; AJMAL, M.; LI, S.; YANG, J.; ULLAH, S. Evaluation of Pedotransfer Functions to Estimate Soil Water Retention Curve: A Conceptual Review. **Water**, v. 16, n. 17, p. 2547, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16172547>

FERNANDES, M. M. H.; SILVA, M. F.; FERRAUDO, A. S.; FERNANDES, C. Soil structure under tillage systems with and without cultivation in the off-season. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 342, n.1, p.108237, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108237>

FOUAD, Y.; SOLTANI, I.; CUDENNEC, C.; MICHOT, D. Using near-infrared spectroscopy to estimate soil water retention curves with the van Genuchten model. **Geoderma**, v. 454, n.2, 117175, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117175>

GHOSH, A.; KUMAR, S.; KUSHWAHA, B. P.; LAL, R.; SINGH, A. K.; YADAV, V. K.; CHANDRA, A. Impact of short-term pasture development on soil aggregation, temperature sensitivity of soil organic carbon, and functional diversity in semi-arid ecosystem. **Arid Land Research and Management**, v.39, n.3, p. 428-454, 2025. DOI: <https://doi.org.ez14.periodicos.capes.gov.br/10.1080/15324982.2024.2448948>

GUO, Y.; FAN, R.; ZHANG, X.; ZHANG, Y.; WU, D.; MCLAUGHLIN, N.; ZHANG, S.; CHEN, X.; JIA, S.; LIANG, A. Tillage-induced effects on SOC through changes in aggregate stability and soil pore structure. **Science of The Total Environment**, v. 703, n.2, 134617, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134617>

HUANG, J.; HARTEMINK, A. E. Soil and environmental issues in sandy soils. *Earth-Science Reviews*, v. 208, n.9, p.103295, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103295>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2.ed. Rio de Janeiro, Diretoria de Geociências. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2012. 271p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Território**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <<https://brasilemsintese.ibge.gov.br/territorio.html>>. Acesso em: 06/06/2025.

KAISE, D. R.; SILVA, V. R. Água no solo. In: Jackson Adriano Albuquerque; Paulo Ivonir Gubiani. (Org.). **Física do Solo**. 1ed.Santa Maria: Pallotti, 2023, v. 1, p. 221-276.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, p. 425-442, 1986. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: relações solo planta**. São Paulo, Agronômica Ceres, 422 p., 1979.

LAVELLE, P.; SPAIN, A.; FONTE, S.; BEDANO, J. C.; BLANCHART, E.; GALINDO, V.; GRIMALDI, M.; JIMENEZ, J. J.; VELASQUEZ, E.; ZANGERLÉ, A. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. *Acta Oecologica*, v. 105, n.5, p.e103561, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103561>



LIMA, D. A. **Cerrado e modos de vida tradicionais no Maranhão, Piauí e Tocantins.**

[livro eletrônico] / Débora Assumpção e Lima; coordenação Helena Lopes, Emmanuel Ponte, Gerardo Vega. 1. ed. Rio de Janeiro: ActionAid Brasil, 2021.

LIMA; C. L. R.; KAISE, D. R. Estrutura e agregação do solo. In: Jackson Adriano Albuquerque; Paulo Ivonir Gubiani. (Org.). **Física do Solo**. 1ed.Santa Maria: Pallotti, 2023, v. 1, p. 71-102.

LIU, C.; SI, B.; ZHAO, Y.; WU, Z.; LU, X.; CHEN, X.; HAN, X.; ZHU, Y.; ZOU, W. Drivers of soil quality and maize yield under long-term tillage and straw incorporation in Mollisols. **Soil and Tillage Research**, v. 246, n.2, p.106360, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106360>

LOCATELLI, J. L.; SANTOS, R. S.; TENELLI, S.; SOARES, M. B.; GROSSO, S. D.; STEWART, C. E.; POPIN, G. V.; BERTOL, F. D.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P. Soil carbon allocation, composition, and sequestration changes induced by cropping diversification in tropical systems. **Soil and Tillage Research**, v. 248, n. 5, p.106464, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106464>

MEDEIROS, A. S.; GONZAGA, G. B. M.; SILVA, T. S.; BARRETO, B. S.; SANTOS, T. C.; MELO, P. L. A.; GOMES, T. C. A.; MAIA, S. M. F. Changes in soil organic carbon and soil aggregation due to deforestation for smallholder management in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma Regional**, v. 33, n.6, p.e00647, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00647>

MELLONI, R.; MELLONI, E.G.P.; ALVARENGA, M.I.N. Indicadores da qualidade do solo. **Informe Agropecuário**, v. 29, n. 244, p. 17-29, 2008.

MICHELON, C.J.; KAISER, D. R.; DRESCHER, M. S.; BRAIDA, J. A. Densidade e porosidade do solo. In: Jackson Adriano Albuquerque; Paulo Ivonir Gubiani. (Org.). **Física do Solo**. 1ed.Santa Maria: Pallotti, 2023, v. 1, p. 103-127.

MONDAL, S.; CHAKRABORTY, D. Global meta-analysis suggests that no-tillage favourably changes soil structure and porosity. **Geoderma**, v. 405, n.1, p.115443, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115443>

MOTA, J. C. A.; MENEZES, A. S.; DO NASCIMENTO, C. D. V.; DE ALENCAR, T. L.; DE ASSIS JÚNIOR, R. N.; TOMA, R. S.; ROMERO, R. E.; COSTA, M. C. G.; COOPER, M. Pore shape, size distribution and orientation in Bt horizons of two Alfisols with and without cohesive character from Brazil. **Geoderma Regional**, v. 15, n.12, e00197, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00197>

MOURA, E G, ALBUQUERQUE, J. M, AGUIAR, A. C. F. Growth and productivity of corn as affected by mulching and tillage in alley cropping systems. **Scientia Agricola**, v.65, n.2, p.204-208, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000200014>

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, v.12, n.3, p.513-522, 1976. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>

OLIVEIRA, D. M. S.; SANTOS, R. S.; CHIZZOTTI, F. H. M.; BRETAS, I. L.; FRANCO, A. L. C.; LIMA, R. P.; FREITAS, D. A. F.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P. Crop, livestock, and forestry integration to reconcile soil health, food production, and climate change mitigation in the Brazilian Cerrado: A review. **Geoderma Regional**, v. 37, n.6, e00796, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00796>

OLIVEIRA, J. R. DE; NASCIMENTO, T. S. DO ; JÚNIOR, A. O. N.; FERREIRA, W. A.; BORGES, A. M.; GONTIJO, I.; PIRES, F. R.; BONOMO, R.; COSME, D. B.; LOPES, V. C.; CRUZ, G. B. DA. Physical attributes of an ultisol under different uses in the north of Espírito Santo. **Journal of Agricultural Science**, v.15, n.4, p.1-6, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v15n4p1>

OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; SILVA, M.B.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; MENDONCA-SANTOS, M. L.; MOURA-BUENO, J. M.; SANTIAGO, C. M. Solos da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos (RCC do Maranhão). In: Silva, M. B.; Lumbreras, J. F.; Coelho, M. R.; Oliveira, V. A. de. (Org.). **Guia de campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC do Maranhão**. 1ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2020, v. 1, p. 331-478.

PARIHAR, C. M.; SINGH, A. K.; JAT, S. L.; DEY, A.; NAYAK, H. S.; MANDAL, B. N.; SAHARAWAT, Y. S.; JAT, M. L.; YADAV, O. P. Soil quality and carbon sequestration under conservation agriculture with balanced nutrition in intensive cereal-based system. **Soil and Tillage Research**, v. 202, 104653, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104653>

PESSOA, T. N.; BOVI, R. C.; NUNES, M. R.; COOPER, M.; UTEAU, D.; PETH, S.; LIBARDI, P. L. Clay mineral composition drives soil structure behavior and the associated physical properties in Brazilian Oxisols. **Geoderma Regional**, v. 38, n.9, e00837, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00837>

PINTO, L. A. S. R.; SILVA, C. F.; MELO, T. R.; ROSSET, J. S.; PEREIRA, M. G. Stability, labile organic carbon, and glomalin of biogenic aggregates in sandy soils under management systems in the subtropical region of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 46, n.11, p. e0220074, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220074>

QI, Z.; JINGFANG, S.; WENWEI, L. A survey about characteristics of soil water retention curve. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v.153, n.6, p. 062076, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/153/6/062076>

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Austria: Vienna, 2021.

RADA, N. Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle. *Food Policy*, v. 38, n.2, p. 146-155, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.11.002>

RAMOS, H. M. M. **Funções de pedotransferência para estimativa da densidade e atributos físico-hídricos de solos do estado do Piauí**. 2017. 50f. Tese (Doutorado em Agronomia - Agricultura Tropical) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2017.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. F.; SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000400033>.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: Causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v.26, n.3, p.321-344, 2005. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2005v26n3p321>

SALVIANO, A. M.; CUNHA, T. J. F.; OLSZEWSKI, N.; OLIVEIRA NETO, M. B.; GIONGO, V.; QUEIROZ, A. F.; MENEZES, F. J. S. Potencialidades e limitações para o uso agrícola de solos arenosos na região semiárida da Bahia. **Magistra**, v. 28, n.2, p. 137–148, 2017.

SANO, S. M. A oferta ambiental do Cerrado e seu uso. **Ciência e Cultura**, v. 63, n. 3, p. 37-38, 2011.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 2, p. 313-319, 1997.

SILVA, M. F.; FERNANDES, M. M. H.; FERNANDES, C.; SILVA, A. M. R.; FERRAUDO, A. S.; COELHO, A. P. Contribution of tillage systems and crop succession to soil structuring. **Soil and Tillage Research**, v. 209, n. 5, 104924, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104924>



SILVA, T. P.; NICOLAU, C. S. S.; JUNQUEIRA, C. W. R.; SANT'ANNA, G. S. L.; ZONTA, E.; SCHULTZ, N.; COELHO, I. S.; PEREIRA, M. G. Are bacterial communities and aggregation in fragile soils influenced by the management system?. *Farming System*, v. 3, n. 1, p. 100125, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2024.100125>

SILVEIRA, A. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; ROCHA, W. W.; LEITE, A. M. P.; FARIA, V. L.; SANTOS, J. J. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico sob diferentes usos do solo e floresta nativa. *Scientia Forestalis*, v.51, n., p.e3992, 2023. <https://doi.org/10.18671/scifor.v51.24>

SIX, J.; PAUSTIAN, K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 68, n.1, p. A4-A9, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.014>

SOTTA, E. D.; SAMPAIO, F. G.; MARZALL, K.; SILVA, W. G. S. **Estratégias de adaptação às mudanças do clima dos sistemas agropecuários brasileiros**. Brasília: MAPA/SENAR, 2021. 187 p.

SOUSA, C. S.; KLEIN, E. L.; VASQUEZ, M. L.; LOPES, E. C. S.; TEIXEIRA, S. G.; OLIVEIRA, J. K. M.; MOURA, E. M.; LEÃO M. H. B. Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Maranhão. In: KLEIN, E. L.; SOUSA, C. S. de (org.). **Geologia e recursos minerais do estado do Maranhão**. Belém, PA: CPRM, 2012. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17861?show=full>. Acesso em: 22 mar. 2024.

SOUSA, T. R.; RAMOS, M. L. G.; FIGUEIREDO, C. C.; CARVALHO, A. M. **N<sub>2</sub>O emissions from soils under different uses in the Brazilian Cerrado – A review**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 45, n.9, p.e0210093, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210093>

SOUZA, H. A.; LEITE, L. F. C.; MEDEIROS, J. C. **Solos sustentáveis para a agricultura no Nordeste**. Brasília: Embrapa, 2021. 595 p.

SOUZA, R. S.; MORAIS, I. S.; ROSSET, J. S.; RODRIGUES, T. M.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G. Aggregation as soil quality indicator in areas under different uses and managements. *Farming System*, v. 2, n. 2, p.100082, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2024.100082>.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed. Tec). **Manual de métodos de análises de solo**. 3. ed. rev. e ampl., Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573p.



TEIXEIRA, W. G.; BHERING, S. B. Retenção de água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed. Tec). **Manual de métodos de análises de solo**. 3. ed. rev. e ampl., Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573p.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **European journal of soil science**, v. 33, n. 1, p. 141-163, 1982.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>

TISOTT, S. T.; SCHMIDT, V. Expansão e intensificação das culturas agrícolas no Bioma Cerrado na Região Centro-Oeste do Brasil. **Brazilian Journal of Business**, v. 3, n. 3, p. 2280–2294, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34140/bjbv3n3-020>

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity on unsaturated soil. **Soil Science Society of American Journal**, v. 44, n. 3, p. 892-897, 1980. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

WILLIAMS, B. A.; WATSON, J. E. M.; BEYER, H. L.; GRANTHAM, H. S.; SIMMONDS, J. S.; ALVAREZ, S. J.; VENTER, O.; STRASSBURG, B. B. N.; RUNTING, R. K. Global drivers of change across tropical savannah ecosystems and insights into their management and conservation. **Biological Conservation**, v. 276, e109786, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2022.109786>.

WINKLER, K.; FUCHS, R.; ROUNSEVELL, M.; HEROLD, M. Global land use changes are four times greater than previously estimated. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, 2501, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2>

XU, L.; YU, Q.; BAI, S.; WANG, M.; SUN, W.; XU, S.; SHI, X.; LU, J.; XIE, X.; QIU, W. Soil organic carbon impact on soil physical properties through quantity and quality modifications. **Soil Advances**, v. 2, n.10, p,100014, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilad.2024.100014>

YUDINA, A.; Y. KUZUYAKOV. Saving the face of soil aggregates. **Global Chance Biology**, v. 11, n.11, p. 3574-3577, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14779>



ATA N° 3559/2025 - CEAD (12.28.01.36)

N° do Protocolo: 23083.039889/2025-12

Seropédica-RJ, 22 de julho de 2025.

### ATA DE DEFESA

Aos quatorze dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e cinco, às treze horas, através de web conferência, instalou-se a banca examinadora de Trabalho de Conclusão do Curso de Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos, do cursista **Carlos Augusto Rocha de Moraes Rego**, sob a orientação do professor **Eduardo Carvalho da Silva Neto**. A banca examinadora foi composta pelos pesquisadores **Renata Coura Borges** e **Cassiano Augusto Rolim Bernardino**. A defesa do TCC intitulado "**Características Físico-Hídricas de um Argissolo no Cerrado Maranhense Sob Diferentes Manejos**" foi iniciada às treze horas e teve a duração de quinze minutos de apresentação seguida da avaliação pela banca. O cursista, após avaliado pela banca examinadora, obteve o seguinte resultado:

(X) APROVADO, devendo o cursista proceder à eventual revisão solicitada pelo supervisor e /ou pela banca, e entregar a versão final em até 15 dias à coordenação do Curso.

( ) NÃO APROVADO.

Seropédica, 14 de julho de 2025.

**Cassiano Augusto Rolim Bernardino**  
Primeiro Examinador

**Renata Coura Borges**  
Segunda Examinadora

**Eduardo Carvalho da Silva Neto**  
Presidente

**Carlos Augusto Rocha de Moraes Rego**  
Cursista

*(Assinado digitalmente em 22/07/2025 14:36)*  
EDUARDO CARVALHO DA SILVA NETO  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DepIS (12.28.01.00.00.33)  
Matricula: ###46489

*(Assinado digitalmente em 22/07/2025 11:20)*  
RENATA COURA BORGES  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DepIS (12.28.01.00.00.33)  
Matricula: ###21788

*(Assinado digitalmente em 22/07/2025 17:06)*  
CASSIANO AUGUSTO ROLIM BERNARDINO  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: ###.###.317-##

*(Assinado digitalmente em 22/07/2025 15:38)*  
CARLOS AUGUSTO ROCHA DE MORAES REGO  
DISCENTE  
Matricula: 2024#####6