

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE EDUCAÇÃO, AGRICULTURA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**IMPACTOS NO USO E MANEJO DO SOLO SOBRE AS PROPRIEDADES
HIDRÁULICAS NO SUL DO AMAZONAS, BRASIL**

JOEL GUERREIRO NASCIMENTO

ORIENTADOR: PROF. DRº. JOSÉ MAURÍCIO DA CUNHA

Humaitá/AM

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE EDUCAÇÃO, AGRICULTURA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

**IMPACTOS NO USO E MANEJO DO SOLO SOBRE AS PROPRIEDADES
HIDRÁULICAS NO SUL DO AMAZONAS, BRASIL.**

JOEL GUERREIRO NASCIMENTO

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ MAURÍCIO DA CUNHA
COORIENTADOR: PROF. DR. BRUNO CAMPOS MANTOVANELLI

Humaitá/AM

2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

-
- N244i Nascimento, Joel Guerreiro
Impactos no Uso e Manejo do Solo Sobre as Propriedades Hidráulicas no Sul do Amazonas, Brasil. / Joel Guerreiro Nascimento. - 2025.
94 f. : il., p&b. ; 31 cm.
- Orientador(a): José Maurício da Cunha.
Coorientador(a): Bruno Campos Mantovanelli.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Humaitá, 2025.
1. Qualidade do solo. 2. Estrutura edáfica. 3. compactação. 4. Sustentabilidade. 5. Amazônia. I. Cunha, José Maurício da. II. Mantovanelli, Bruno Campos. III. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. IV. Título
-

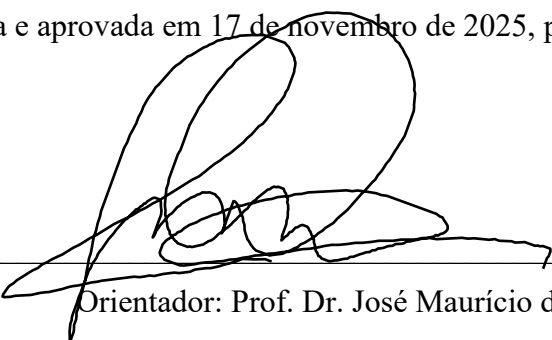
FOLHA DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: IMPACTOS NO USO E MANEJO DO SOLO SOBRE AS PROPRIEDADES
HIDRÁULICAS NO SUL DO AMAZONAS, BRASIL.**

(Linha de Pesquisa: Componentes e Dinâmicas dos Ecossistemas com ênfase no Bioma Amazônico)

JOEL GUERREIRO NASCIMENTO

Dissertação defendida e aprovada em 17 de novembro de 2025, pela comissão julgadora:



Orientador: Prof. Dr. José Maurício da Cunha
(PPGCA/UFAM) Orientadora / Presidente

Documento assinado digitalmente
gov.br ALINE LESSA DE SOUZA
Data: 01/01/2026 21:54:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Aline Lessa de Souza
Examinadora: Interno (IEAA/PPGCA/UFAM)

Documento assinado digitalmente
gov.br JEFERSON TONIN
Data: 31/12/2025 20:04:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Jeferson Tonin
Examinador (a): Externo

Esta pesquisa foi realizada com o apoio do Governo do Estado do Amazonas, por intermédio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), mediante a concessão de bolsa de estudos.



AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me permitir estar aqui, por minha saúde e por colocar em meu caminho pessoas boas e intencionadas em me ajudar. Sua proteção diária é minha força nos dias difíceis.

Agradeço também a alguns professores e profissionais que admiro profundamente e que se tornaram verdadeiros amigos ao longo deste caminho, sou grato por me mostrar a importância da pesquisa, por sua paciência e por tornar o ato de ensinar a mais nobre das profissões. A Aline Santos e Keithiane Freire Ramos, meu reconhecimento pela valiosa colaboração e apoio incondicional. E ao Renato Francisco, cuja expertise e amizade enriqueceram minha jornada profissional de maneiras inestimáveis. A cada um de vocês, meu sincero agradecimento por serem fontes constantes de inspiração e apoio.

A meu orientador, José Maurício da Cunha e coorientador, Bruno Campos Mantovanelli merece meu agradecimento pela generosidade em compartilhar seu conhecimento, pela crença em meu potencial e pelo constante incentivo ao meu crescimento profissional. Sua orientação e apoio nos momentos de dúvida foram fundamentais, assim como sua confiança em minhas decisões.

Especial agradecimento a minha família, à minha mãe Antônia Guerreiro e meu pai Edivaldo Soares Nascimento, meu alicerce diário e minha eterna fonte de apoio. Agradeço por sempre acreditarem em meu potencial.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA-UFAM) pela oportunidade de cursar este mestrado. Agradeço também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Amazonas (FAPEAM) pela bolsa concedida para realização da pesquisa.

EPÍGRAFE

O mundo tornou-se perigoso, porque os homens aprenderam a dominar a natureza antes de se dominarem a si mesmos.

Albert Schweitzer.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.2 JUSTIFICATIVA E PROBLEMÁTICA	13
1.2. HIPÓTESE.....	15
2. OBJETIVOS	16
2.1 Geral.....	16
2.2 Específicos	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1. Conservação do Solo.....	17
3.2 Hidrologia dos Solos Agrícolas	18
3.3. Indicadores de Qualidade Física do Solo	20
3. 4 Alterações no Uso Da Terra	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1 Áreas De Estudo.....	34
4.2 Histórico da Ocupação e Manejo do Solo.....	35
4.3 Atividade de Campo.....	38
4.4 Análises Físicas do Solo	40
4.4.1 A análise da textura do solo	40
4.4.2 Estabilidade de agregados.....	42
4.4.3 Densidade de porosidade do solo.....	45
4.4.4 Umidade gravimétrica e volumétrica do solo	46
4.4.5 Porosidade do solo	46
4.4.6 Resistência à penetração de solo.....	46
4.4.7 Teste de infiltração.....	48
4.4.8 Curva de retenção de água e condutividade hidráulica.....	49
5. ANÁLISES ESTATÍSTICAS	52
6. RESULTADOS	53

6.1 Análise descritiva.....	53
6.2 Efeitos dos manejos no uso do solo	58
6.3 Efeitos dos Manejos na agregação do solo	59
6.4 Impactos dos manejos na textura do solo	61
6.5 Efeito dos cultivos na Porosidade do solo	62
6.6 Infiltração de água no solo.....	63
6.7 Curva de retenção de água e condutividade hidráulica.....	65
7. DISCUSSÕES	68
7.1 Efeitos dos manejos sob os atributos físicos do solo	68
7.2 Efeitos dos diferentes manejos do solo nas propriedades hidráulicas	70
8.CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
REFERÊNCIAS	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma dos principais Indicadores físicos do solo.....	21
Figura 2. Sistema cultivo de pastagem.....	30
Figura 3. Cultivo do Açaí (<i>Euterpe oleracea</i> Mart) ..	31
Figura 4. Cultivo de macaxeira (<i>Manihot esculenta</i> Crantz).....	32
Figura 5. Mapa de localização da área experimental; pastagens, floresta, macaxeira e açaí.....	34
Figura 6. Área de floresta.....	37
Figura 7. Abertura de trincheiras. 7A) Trincheira na plantação de açaí; 7B) e 7C) Trincheira em área de pastagem de gado bovino.....	39
Figura 8. Anéis volumétricos com solos dos ambientes analisados.....	40
Figura 9. Amostras submetidas a agitação.....	41
Figura 10. Processo de decantação onde ocorre a separação de misturas heterogêneas.....	41
Figura 11. Material levado a estufa para secagem.....	42
Figura 12. Aparelho Yolder (Solotest).....	43
Figura 13. Uma das etapas de peneiramento do material.....	44
Figura 14. Pesagem do anel volumétrico contendo solo de um dos ambientes estudados.....	45
Figura 15. Utilização do penetrômetro eletrônico.....	47
Figura 16. Infiltrômetro sendo utilizado no ambiente com plantação de açaí.....	48
Figura 17. Boxplot e teste de média, Avaliação da Densidade do solo (A), Resistência à penetração (B), Umidade volumétrica (C) e Umidade gravimétrica (D), entre os sistemas de uso do solo. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indica diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.....	58
Figura 18. Boxplot e teste de média dos agregados do solo em diferentes ambientes, (A) 1mm, (B) 1-2mm, (C) > 2mm, (D) DMG, (E) DMP, Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indica diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.....	59
Figura 19. Boxplot e teste de média da textura do solo em diferentes tipos de manejo, Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indica diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.....	60
Figura 20. Boxplot e teste de média da porosidade do solo em diferentes manejos, Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indica diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.....	62
Figura 21. Teste de infiltração de água no solo sob quatro áreas de cultivos, (A) pastagem, (B) macaxeira, (C) floresta e (D) Açaí.....	63
Figura 22. Curva Ajustadas de retenção de água no solo sob quatro áreas de cultivos; Açaí, Macaxeira, Pastagem e Floresta.....	65
Figura 23. Curva ajustadas de condutividade Hidráulica, van Genuchten - Mualem, sob diferente sistema de cultivos.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Áreas sob pastagem, macaxeira, açaí e floresta na região sul do Amazonas.....	36
Tabela 2. Análises descritivas e teste de normalidade dos atributos físicas do solo sob manejo de Açaí, Macaxeira, pastagem e floresta.....	53 e 54
Tabela 3. Análises descritivas e teste de normalidade dos atributos físico-hídricos do solo em diferentes ambientes na camada de 0-20 m.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
GPS – Sistema de Posicionamento Global
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ODS - Objetivos de desenvolvimento Sustentável
ONU - Organização das Nações Unidas
PCA - Agrupamento, componentes principais
RUSLE - Revised Universal Soil Loss Equation
SPD - O Sistema de Plantio Direto
USLE - Universal Soil Loss Equation
CRAs – Curva de retenção de água no solo
IEA - Índice de Estabilidade dos Agregados
AGRA - Porcentagem de Agregados de Diâmetro Superior a 2,0 mm
PT- Porosidade total do solo
RSP- Resistencia solo a penetração
DS- Densidade do solo
UV- Umidade volumétrica
UG – Umidade gravimétrica
DMG - Diâmetro médio geométrico
DMP - Diâmetro médio ponderado

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

°C	graus celsius
g	grama
>	maior
<	menor
%	percentual
mm	milímetro
NaOH	hidróxido de sódio
N	Newton

RESUMO

NASCIMENTO, Joel Guerreiro. **Impactos do uso e manejo do solo sobre as propriedades hidráulicas no sul do Amazonas – Brasil**. Humaitá-AM, 2025. 85f. Projeto de Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Educação Agricultura e Ambiente/ Universidade Federal do Amazonas de Humaitá-AM, Humaitá-AM, 2025.

A substituição de florestas por áreas agrícolas ou pastagens altera os atributos físicos do solo, elevando sua densidade e reduzindo a matéria orgânica; compreender esses efeitos é essencial para conservar o solo e a água e promover sistemas agrícolas sustentáveis. O objetivo desta pesquisa foi analisar os impactos no uso e manejo do solo sobre as propriedades físicas e hidráulicas do solo em diferentes sistemas de uso no sul do Amazonas, envolvendo áreas de floresta nativa, pastagem, cultivo de açaí e macaxeira. A pesquisa foi conduzida com a aplicação de métodos de campo e laboratório, incluindo testes de estabilidade de agregados, resistência do solo à penetração, análises de porosidade, textura e infiltração de água. Este estudo avaliou os efeitos de diferentes usos e manejos do solo sobre as propriedades físicas e hidráulicas em áreas de floresta nativa, pastagem, cultivo de açaí e macaxeira no sul do Amazonas. Foram determinados atributos como densidade do solo (DS), resistência à penetração (RSP), umidades volumétricas (Uv) e gravimétrica (Ug), distribuição de agregados, infiltração e parâmetros das curvas de retenção e condutividade hidráulica. As análises de retenção de água foram realizadas nos potenciais matriciais de -1, -3, -6, -10, -30, -50, -75, -1000 e -1500 kPa, ajustadas pelo modelo de van Genuchten. Os resultados demonstraram que a DS aumentou em profundidade, variando de 1,25 a 1,45 g cm⁻³, com maiores valores sob açaí e macaxeira, indicando compactação moderada a alta. A RSP ultrapassou 3,0 MPa em pastagem (0–20 cm), limite crítico ao crescimento radicular, enquanto na floresta manteve-se abaixo de 1,5 MPa, refletindo melhor estrutura. A Uv apresentou maiores valores superficiais sob macaxeira (0,33 kg kg⁻¹) e floresta (0,32 kg kg⁻¹), e menores sob pastagem (0,25 kg kg⁻¹ a 40–60 cm). O Diâmetro Médio Geométrico (DMG) e o Diâmetro Médio Ponderado (DMP) variaram entre 1,1–2,8 mm, com maior estabilidade na floresta. As curvas de condutividade hidráulica saturada (Ks) ajustadas pelo modelo de van Genuchten Mualem variaram entre 25,70 mm h⁻¹ (macaxeira) e 81,22 mm h⁻¹ (pastagem), evidenciando forte influência da estrutura e conectividade dos poros. Conclui-se que o uso intensivo e o manejo inadequado, especialmente em pastagem e macaxeira, promovem degradação física e redução da funcionalidade hidráulica, enquanto a floresta e o cultivo perene de açaí preservam a qualidade estrutural e hidrológica do solo amazônico.

Palavras-chave: Qualidade do solo; Estrutura edáfica; Compactação; Sustentabilidade; Amazônia.

ABSTRACT

NASCIMENTO, Joel Guerreiro. **Impacts of land use and management on hydraulic properties in southern Amazonas – Brazil.** Humaitá-AM, 2025. 85f. Projeto de Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Educação Agricultura e Ambiente/ Universidade Federal do Amazonas de Humaitá-AM, Humaitá-AM, 2025.

The replacement of forests by agricultural or pasture areas alters the physical attributes of soils, increasing bulk density and reducing organic matter content. Understanding these effects is essential for conserving soil and water resources and promoting sustainable agricultural systems. This study aimed to analyze the impacts of land use and management on the physical and hydraulic properties of soils under different land-use systems in southern Amazonas, Brazil, including native forest, pasture, açaí (*Euterpe oleracea*) cultivation, and cassava (*Manihot esculenta*). Field and laboratory methods were applied, including tests for aggregate stability, soil penetration resistance, porosity, texture, and water infiltration. The evaluated attributes included bulk density (BD), soil penetration resistance (SPR), volumetric (θ_v) and gravimetric (θ_g) moisture, aggregate distribution, infiltration, and parameters of water retention and hydraulic conductivity curves. Water retention analyses were performed at matric potentials of -1 , -3 , -6 , -10 , -30 , -50 , -75 , -1000 , and -1500 kPa, fitted using the van Genuchten model. Results showed that BD increased with depth, ranging from 1.25 to 1.45 g cm⁻³, with higher values under açaí and cassava, indicating moderate to high compaction. SPR exceeded 3.0 MPa in pasture (0–20 cm), a critical threshold for root growth, while remaining below 1.5 MPa in forest soils, reflecting better structure. The mean geometric diameter (MGD) and mean weight diameter (MWD) ranged from 1.1 to 2.8 mm, with greater stability under forest. Saturated hydraulic conductivity (K_s), modeled using van Genuchten–Mualem, varied from 25.70 mm h⁻¹ (cassava) to 81.22 mm h⁻¹ (pasture), indicating strong influence of pore structure and connectivity. It was concluded that intensive land use and inadequate management, particularly in pasture and cassava areas, promote physical degradation and reduce hydraulic functionality, whereas forest and perennial açaí cultivation help preserve the structural and hydrological quality of Amazonian soils.

Keywords: Soil quality; Soil structure; Compaction; Sustainability; Amazon.

1. INTRODUÇÃO

O solo constitui uma camada dinâmica e viva, formada por processos de intemperismo das rochas, ciclagem de nutrientes essenciais às plantas e decomposição da matéria orgânica. Sua fertilidade está diretamente associada à presença e à disponibilidade desses nutrientes, influenciando significativamente sua qualidade e seu uso sustentável (Lopes; Guilherme, 2007). No entanto, a intensificação do uso da terra ao longo dos anos tem contribuído para a degradação progressiva dos solos, afetando sua estrutura, funcionalidade e capacidade produtiva.

Nas últimas décadas, a expansão das fronteiras agrícolas tem promovido mudanças significativas nos ecossistemas naturais, sobretudo nas regiões tropicais. Cenários projetados indicam que, ao longo do século XXI, áreas como o Cerrado e a Amazônia tendem a registrar maior avanço das atividades agrícolas, impulsionado por políticas de desenvolvimento que estimulam a intensificação do uso da terra (Zhang *et al.*, 2020). Diante desse cenário, torna-se fundamental implementar estratégias de gestão territorial capazes de monitorar e controlar os principais vetores responsáveis por essas transformações.

Nesse contexto, tais mudanças podem ser monitoradas por meio do projeto MapBiomass, que utiliza a plataforma Google Earth Engine (GEE), associando técnicas de sensoriamento remoto e inteligência artificial para o mapeamento anual do território brasileiro. Os dados gerados têm sido amplamente utilizados em análises ambientais e no apoio à formulação de políticas públicas voltadas à gestão territorial, ao combate ao desmatamento e à conservação dos biomas.

Entre 1985 e 2023, observou-se um aumento expressivo da área ocupada por atividades agropecuárias no Brasil, que passou de 22% (187,3 milhões de hectares) para 33% do território nacional (282,5 milhões de hectares), evidenciando a contínua expansão da fronteira agrícola e os desafios associados ao uso intensivo do solo (MapBiomass, 2023).

Na região sul do Amazonas, a transformação do uso do solo extrapola o simples avanço agrícola e assume dimensão estratégica na relação entre sociedade e ambiente. A expansão de cultivos como açaí, macaxeira e pastagens ocorre em um contexto de pressões socioeconômicas crescentes, no qual as decisões sobre o uso da terra nem sempre consideram a complexidade dos sistemas ecológicos locais. Essas mudanças, frequentemente associadas a manejos inadequados ou à ausência de assistência técnica, impactam diretamente os atributos físicos do solo, especialmente sua capacidade de infiltrar, reter e conduzir água (Bocutti *et al.*, 2020; Gonçalves; Libardi, 2013).

Embora a paisagem amazônica aparente resiliência, a realidade edáfica revela fragilidades frente ao uso intensivo e à ausência de estratégias de conservação. A estrutura do solo constitui um componente-chave para sua funcionalidade e, quando comprometida, interfere não apenas na produtividade agrícola, mas também em processos hidrológicos fundamentais, como a recarga de aquíferos, o controle da erosão e a manutenção da biodiversidade (Reichert *et al.*, 2003; Andrade *et al.*, 2020). Nesse sentido, torna-se essencial compreender como diferentes formas de uso da terra impactam as propriedades hidráulicas do solo.

A coexistência de sistemas produtivos distintos — desde áreas florestais preservadas até cultivos intensivos — possibilita uma análise comparativa dos impactos do uso antrópico na dinâmica hídrica do solo. Dessa forma, é possível observar como essas intervenções alteram propriedades físicas, como a densidade do solo, promovendo processos de degradação muitas vezes silenciosos e cumulativos (Araújo *et al.*, 2007; Collares *et al.*, 2011).

Essas alterações físicas impactam diretamente os processos hidrológicos, comprometendo a capacidade de infiltração, retenção de umidade e condutividade do solo. Sistemas de pastagem, por exemplo, submetem o solo à compactação decorrente do pisoteio contínuo dos animais, o que altera negativamente a estrutura porosa e dificulta o movimento de água e gases (Collares *et al.*, 2011). No caso dos açaizais, embora se observe crescimento significativo da cultura, a intensificação do manejo — com uso de maquinário e remoção de material vegetal — pode deixar o solo exposto e vulnerável à degradação durante os períodos chuvosos (Carvalho, 2018).

No cultivo da macaxeira, predomina o preparo convencional do solo, prática que inicialmente favorece a descompactação. Contudo, o revolvimento frequente tende a provocar efeitos negativos ao longo do tempo, comprometendo a estabilidade dos agregados e reduzindo a fertilidade, sobretudo em razão da perda de matéria orgânica. Nesse contexto, o sistema de plantio direto apresenta-se como uma alternativa mais sustentável, embora ainda esteja em processo de consolidação em diferentes regiões produtoras (Lima *et al.*, 2015).

Métodos de avaliação em campo têm se mostrado eficazes para mensurar esses impactos. Entre eles, destacam-se os métodos de Horton e Beerkan, que permitem medições mais próximas da realidade, com boa representatividade espacial e aplicabilidade em regiões remotas (Lassabatère *et al.*, 2006; Angulo-Jaramillo *et al.*, 2019). A adoção desses métodos nesta pesquisa visa à obtenção de dados consistentes sobre infiltração, curva de retenção e condutividade hidráulica, possibilitando diagnósticos mais precisos acerca do estado físico-

hídrico do solo nos diferentes usos analisados.

Estudos realizados na região amazônica indicam que solos sob floresta apresentam valores significativamente superiores de infiltração e condutividade hidráulica quando comparados a áreas convertidas para agricultura ou pastagem. Em análise realizada por Zimmermann *et al.* (2006), verificou-se que a taxa de infiltração sob floresta natural foi superior à observada em solos cultivados com bananeira, teca e pastagem. De forma semelhante, a conversão de floresta para soja e pastagem reduziu drasticamente a taxa de infiltração e a condutividade hidráulica, passando de 1.258 mm h^{-1} para 490 e 100 mm h^{-1} , e de 567 mm h^{-1} para 122 e 97 mm h^{-1} , respectivamente (Scheffler *et al.*, 2011).

Desse modo, a relevância científica e social desta pesquisa reside não apenas em compreender os impactos do uso do solo sobre as propriedades hidráulicas, mas também em oferecer subsídios técnicos e científicos que orientem ações públicas e privadas voltadas à conservação dos recursos naturais, à mitigação dos impactos ambientais e à promoção de uma agricultura mais sustentável e resiliente na Amazônia.

1.2 JUSTIFICATIVA E PROBLEMÁTICA

A floresta amazônica, considerada o maior e mais complexo sistema de floresta tropical do mundo (Phillips *et al.*, 2008), enfrenta atualmente intensas pressões decorrentes da expansão da fronteira agrícola, o que tem resultado em mudanças aceleradas no uso do solo. A substituição da vegetação nativa por cultivos e pastagens (Scheffler *et al.*, 2011) compromete o equilíbrio hidrológico da região, favorecendo processos erosivos, perdas de nutrientes e a degradação da estrutura do solo, com impactos negativos tanto sobre a produtividade agropecuária quanto sobre a conservação dos recursos naturais.

Embora haja avanços em estudos sobre a qualidade do solo em diferentes regiões do Brasil, ainda persiste uma lacuna significativa de informações voltadas à realidade amazônica, especialmente no que se refere às propriedades hidráulicas do solo em áreas submetidas a intensas transformações territoriais. A elevada diversidade de sistemas de uso e a rápida dinâmica de alteração da paisagem tornam urgente a produção de dados regionais. Nesse contexto, a ausência de conhecimento técnico e científico aprofundado compromete não apenas a implementação de práticas sustentáveis, mas também o monitoramento ambiental de longo prazo (Scheffler *et al.*, 2011; Becker, 2010).

Nesse sentido, este estudo se alinha a uma perspectiva de longo prazo, sendo coerente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das

Nações Unidas (ONU). Destacam-se o ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ao incentivar práticas que conservam as propriedades hidráulicas do solo e promovem o aumento da produtividade agrícola; o ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), ao contribuir para a promoção da saúde por meio da preservação dos recursos ambientais; e o ODS 6 (Água Limpa e Saneamento), ao estimular o manejo sustentável da água e a redução da poluição decorrente da degradação do solo.

Além desses, a proposta também dialoga com o ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), ao fomentar o desenvolvimento econômico inclusivo e sustentável, com geração de empregos dignos no meio rural; com o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ao incentivar o uso eficiente dos recursos naturais e práticas agrícolas de baixo impacto ambiental; e com o ODS 15 (Vida Terrestre), ao contribuir para a conservação da biodiversidade e a recuperação de áreas degradadas.

Diante desse panorama, a avaliação dos impactos das mudanças no uso da terra sobre as propriedades hidráulicas do solo na região sul do Amazonas torna-se fundamental para o planejamento territorial, a gestão ambiental e o fortalecimento da agricultura sustentável. A pesquisa proposta, ao analisar áreas com diferentes sistemas de uso — floresta, açazal, macaxeira e pastagem —, busca compreender como essas alterações influenciam atributos físicos e hidrológicos do solo. Essa investigação permitirá identificar indicadores de qualidade do solo que possam subsidiar estratégias de conservação e recuperação ambiental, com base em dados concretos e contextualizados à realidade regional.

No entanto, a ausência de informações confiáveis sobre infiltração, condutividade hidráulica e retenção de água no solo sob diferentes manejos impede uma avaliação precisa do grau de degradação ou da resiliência edáfica local. Quando esses parâmetros não são mensurados, a tomada de decisão permanece pautada por tentativas e erros, aumentando os riscos de colapso hidrológico e ecológico (Fernandez-Galvez *et al.*, 2019).

Assim, a problemática desta pesquisa estrutura-se em torno da necessidade de compreender, de forma comparativa, os efeitos das mudanças no uso do solo sobre as propriedades hidráulicas, oferecendo subsídios técnicos e científicos para a gestão integrada do território.

1.2. HIPÓTESE

A mudança no uso da terra, especialmente a substituição da cobertura florestal por áreas agrícolas e de pastagem, resulta em alterações nas propriedades hidráulicas do solo, incluindo a taxa de infiltração, a condutividade hidráulica e a capacidade de retenção de água. Essas mudanças na cobertura do solo podem provocar impactos significativos no ciclo hidrológico (Flores, 2008).

Partindo desse pressuposto e das discussões apresentadas no referencial teórico, emergiu a seguinte questão norteadora desta pesquisa:

Como as práticas de manejo associadas aos diferentes usos da terra afetam as propriedades hidráulicas do solo na região sul do Amazonas e quais são os possíveis impactos dessas alterações sobre os recursos hídricos locais?

Com base nessa questão, definiu-se a hipótese central da pesquisa:

Hipótese: Áreas submetidas a mudanças no uso da terra, quando comparadas a áreas de floresta natural, apresentam alterações significativas nas propriedades hidráulicas do solo entre os diferentes ambientes analisados.

Essas hipóteses serão testadas por meio da análise de áreas sob diferentes usos da terra, avaliando-se parâmetros hidráulicos específicos do solo, como propriedades físicas, taxa de infiltração e capacidade de retenção de água. A aceitação ou rejeição das hipóteses será baseada em análises estatísticas apropriadas.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar os impactos da mudança das propriedades hidráulicas no uso do solo no sul do Amazonas, com base em dados comparativos entre diferentes sistemas de uso da terra, considerando atributos físicos hidrológicos do solo.

2.2 Específicos

- Avaliar os efeitos de práticas agrícolas sobre a estrutura e o funcionamento hidrológico do solo, considerando diferentes intensidades e históricos de uso;
- Investigar a capacidade de regeneração da qualidade física e hidráulica do solo a partir de indicadores como teor índice de estabilidade de agregados e textura do solo.
- Determinar e comparar a taxa de infiltração com diferentes usos do solo (floresta, pastagem, plantação de macaxeira e plantação de açaí) no sul do Amazonas.
- Analisar as relações entre essas propriedades hidráulicas e atributos físicos do solo, como densidade, porosidade e estabilidade de agregados;
- Subsidiar, com base nos resultados obtidos, estratégias de manejo conservacionista adaptadas às condições locais da região amazônica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Conservação do Solo

O solo é um dos recursos naturais mais essenciais à manutenção da vida humana, desempenhando funções vitais nos ciclos hidrológicos e biogeoquímicos. Atua na dinâmica da água, na ciclagem de nutrientes, na sustentação da biodiversidade e na estabilidade dos ecossistemas (Wadt, 2003; Hartemink, 2016).

Diante dessa relevância, a conservação do solo emerge como um componente fundamental para a sustentabilidade. Nos últimos anos, a preocupação com a preservação da qualidade do solo tem se ampliado, impulsionada por um movimento crescente em direção a práticas agrícolas que buscam mitigar os efeitos da erosão e da degradação, garantindo, assim, a integridade funcional desse recurso para as gerações futuras (Costa *et al.*, 2020).

Nesse contexto, a erosão destaca-se como uma das principais causas de degradação dos solos em escala global, provocando impactos severos e, muitas vezes, irreversíveis sobre a fertilidade e a funcionalidade dos ecossistemas edáficos. De acordo com estimativas do World Soil Information, a erosão já afeta aproximadamente 13% da superfície terrestre, o que corresponde a cerca de 1,65 bilhão de hectares de terras degradadas em todo o mundo (Oldeman, 2000). Esses dados evidenciam a urgência da adoção de práticas de conservação do solo, visando mitigar a perda de nutrientes, preservar a cobertura vegetal e assegurar a sustentabilidade dos sistemas produtivos e ambientais.

Nesse sentido, o manejo sustentável do solo configura-se como uma etapa estratégica tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. Quando o solo passa a ser utilizado para diferentes atividades produtivas, podem ocorrer desequilíbrios nas relações entre o solo e o meio ambiente. Assim, o monitoramento das perdas de solo torna-se fundamental, especialmente quando associadas à erosão hídrica. Estabelecer limites toleráveis de perdas de solo é indispensável para a condução de atividades agrícolas com manejo adequado e ecologicamente sustentável (Silva *et al.*, 2002).

Diante desse cenário, é possível reduzir os impactos ambientais adversos decorrentes do uso do solo por meio da implementação de inovações e da adoção de práticas de conservação do solo e da água, com o objetivo de incrementar a produção e o armazenamento de carbono orgânico no solo (Mo *et al.*, 2017). Para alcançar esse objetivo, é fundamental orientar agricultores quanto às práticas conservacionistas mais adequadas às especificidades de cada sistema produtivo, uma vez que a eficácia dessas estratégias depende diretamente da adesão e participação dos produtores rurais.

A conservação do solo, portanto, é fundamental para garantir a continuidade dos serviços ecossistêmicos e a sustentabilidade dos sistemas produtivos, especialmente diante dos impactos das atividades humanas sobre os ecossistemas. O solo, enquanto capital natural, oferece uma série de recursos e processos essenciais que sustentam a saúde e a produtividade dos ambientes naturais e agrícolas (Dominati; Patterson; Mackay, 2010; Oliveira *et al.*, 2023).

Entre as medidas conservacionistas, o Sistema de Plantio Direto (SPD) tem sido amplamente implementado. Trata-se de um procedimento tecnológico no qual o plantio é realizado sobre o solo não revolvido, mantendo-se a cobertura vegetal. Esse método reduz a intensidade das operações agrícolas, o consumo de combustível e apresenta benefícios ambientais importantes, como a diminuição do risco de erosão em razão da melhoria da estrutura do solo e da manutenção da cobertura permanente. Além disso, contribui para o aumento do teor de carbono orgânico no solo, melhora a retenção de água, amplia a disponibilidade hídrica para as plantas e favorece a biodiversidade edáfica (Blanco-Canqui; Ruis, 2018; Honkanen *et al.*, 2021; Skaal Sveen; Ingram; Clarke, 2019).

Nesse contexto, a conservação do solo envolve a aplicação de práticas fundamentadas em critérios técnicos e científicos que visam preservar e recuperar suas condições físicas, químicas e biológicas, assegurando o uso sustentável sem comprometer sua capacidade produtiva. Entre as funções essenciais que devem ser preservadas, destacam-se as propriedades hidrológicas do solo, como a condutividade hidráulica saturada, a infiltração de água e a curva de retenção hídrica, fundamentais para o equilíbrio dos processos ecológicos e agrícolas (Pachepsky; Genuchten, 2011).

3.2 Hidrologia dos Solos Agrícolas

A hidrologia dos solos agrícolas constitui um campo essencial da ciência do solo, dedicado ao estudo do comportamento da água nos diversos compartimentos ambientais — atmosfera, superfície terrestre e subsuperfície — considerando sua distribuição, propriedades físicas e qualidade. Essa área do conhecimento exerce papel crucial no desenvolvimento sustentável da agricultura, pois interfere diretamente na germinação das sementes, no crescimento das plantas e na produtividade das culturas (Kambalimath & Deka, 2020; Reichardt & Timm, 2016).

A dinâmica hídrica dos solos está intimamente relacionada às suas propriedades físicas, especialmente à textura, à estrutura e ao teor de matéria orgânica. Solos argilosos, por exemplo, apresentam elevada capacidade de retenção de água, mas podem sofrer com

problemas de drenagem e saturação. Em contraste, solos arenosos possuem maior macroporosidade, o que favorece a infiltração rápida da água, porém apresentam baixa capacidade de retenção hídrica, exigindo maior atenção no manejo da irrigação (Souza, 2020).

A infiltração da água no solo depende, em grande medida, do grau de cobertura vegetal e do estado de compactação. Solos bem estruturados e protegidos por cobertura vegetal ou matéria orgânica promovem uma infiltração mais eficiente e profunda, favorecendo o armazenamento de água no perfil do solo. Por outro lado, solos compactados limitam a entrada da água, intensificam o escoamento superficial e favorecem a ocorrência de processos erosivos (Magalhães; Silva; Oliveira, 2022).

Nesse contexto, dois parâmetros fundamentais são a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). A capacidade de campo representa a quantidade máxima de água que o solo pode reter após o escoamento gravitacional, enquanto o ponto de murcha permanente corresponde ao limite inferior de umidade no qual as plantas já não conseguem extrair água do solo. Entre esses dois extremos encontra-se a água disponível para as plantas, considerada a faixa ideal de umidade para o desenvolvimento vegetal (Souza, 2020).

Outro processo relevante é a evapotranspiração, composta pela evaporação da água do solo e pela transpiração das plantas, sendo uma das principais vias de perda hídrica nos sistemas agrícolas. O controle desse processo é essencial para aumentar a eficiência no uso da água. Técnicas como a irrigação localizada, especialmente por gotejamento, e a adoção de cobertura vegetal contribuem para reduzir essas perdas, mantendo a umidade do solo por mais tempo e otimizando o uso dos recursos hídricos (Costa *et al.*, 2020).

Em ambientes onde ocorre excesso hídrico — seja em função de chuvas intensas ou de irrigação excessiva — torna-se necessária a implementação de sistemas de drenagem. Esses sistemas, que podem ser constituídos por valas superficiais ou tubos subterrâneos, evitam o encharcamento do solo, promovem maior aeração e garantem condições adequadas para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas (Costa *et al.*, 2020).

O manejo da irrigação, por sua vez, deve ser realizado de forma criteriosa, com base no monitoramento da umidade do solo, nas necessidades fisiológicas das culturas e nas condições climáticas locais. Tecnologias como sensores de umidade e estações meteorológicas automatizadas têm se tornado ferramentas cada vez mais importantes para o agricultor moderno, contribuindo para maior eficiência hídrica e incremento da produtividade agrícola (Villa, 2022).

Além dos benefícios agronômicos, o manejo adequado da água no solo também

contribui para a proteção ambiental, ao reduzir riscos de lixiviação de nutrientes e agrotóxicos, prevenir a contaminação de corpos d'água e minimizar processos de degradação dos ecossistemas. Nesse sentido, práticas conservacionistas como o plantio direto, a rotação de culturas e os sistemas agroflorestais favorecem a melhoria da estrutura do solo, aumentam sua capacidade de retenção de água e fortalecem a resiliência dos sistemas agrícolas frente às mudanças climáticas (Magalhães; Silva; Oliveira, 2023).

Esses processos estão diretamente relacionados ao ciclo hidrológico, responsável pela redistribuição da água no planeta e fundamental para o funcionamento dos sistemas agrícolas. Esse ciclo inicia-se com a evaporação da água proveniente de corpos hídricos e do próprio solo, seguida pela formação de nuvens e posterior precipitação, abastecendo os ecossistemas terrestres e sustentando a produção agrícola (Silva *et al.*, 2021).

Nas áreas agrícolas, a chuva constitui uma das principais fontes de água para as culturas, sendo sua quantidade e distribuição ao longo do tempo fatores determinantes para a viabilidade das espécies cultivadas. Parte da água precipitada infiltra-se no solo, contribuindo para a recarga dos lençóis freáticos, enquanto outra parcela escoia superficialmente, podendo ocasionar erosão e perdas de nutrientes quando não há manejo conservacionista adequado (Lopes; Cardoso; Silva, 2021).

Por fim, o balanço hídrico do solo representa a relação entre as entradas de água — provenientes principalmente da chuva e da irrigação — e as saídas, associadas à evapotranspiração, ao escoamento superficial e à percolação profunda. A compreensão desse balanço é fundamental para garantir o crescimento saudável das plantas, otimizar o manejo da água e assegurar a produtividade agrícola (Villa, 2022).

3.3. Indicadores de Qualidade Física do Solo

A qualidade física do solo é um atributo inerente a cada tipo de solo, podendo ser alterada por modificações em suas propriedades ou por meio de observações indiretas que indiquem tendências de degradação ou recuperação (Silva *et al.*, 2010). Cada uma dessas dimensões contribui, de forma integrada, para a funcionalidade do solo como suporte da vida vegetal, mediador de fluxos hídricos e interface ativa entre os sistemas naturais.

Em ambientes agrícolas, a avaliação da qualidade do solo é tradicionalmente realizada a partir de três grandes eixos: físico, químico e biológico. Essa abordagem tripartida tem sido amplamente adotada por pesquisadores, como Aratani *et al.* (2009), que destacam sua importância para diagnosticar o grau de conservação ou degradação do solo e,

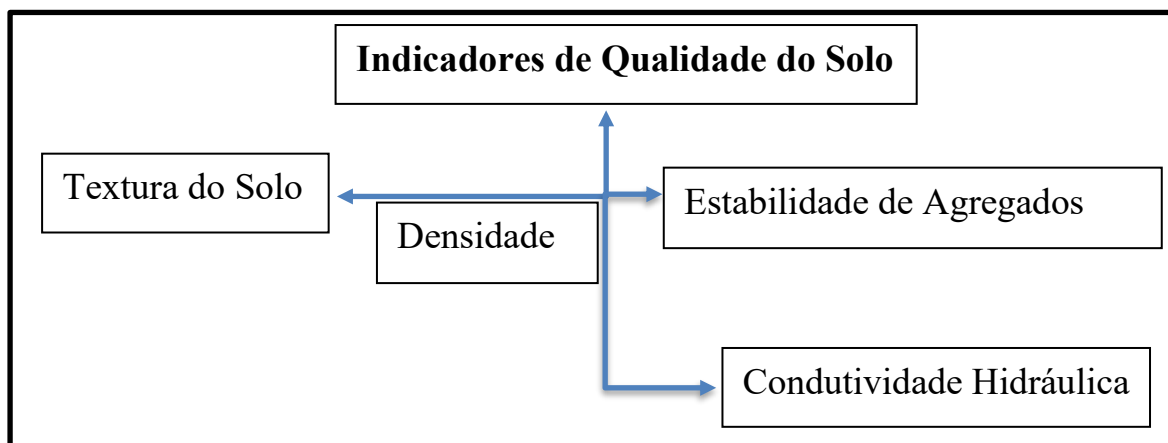
consequentemente, avaliar a sustentabilidade dos sistemas de manejo. Tais avaliações permitem identificar de forma sistemática os efeitos cumulativos das práticas agrícolas e os limites de resiliência dos solos frente ao uso contínuo e, muitas vezes, intensivo.

Estudos realizados por Reichert *et al.* (2003), Araújo *et al.* (2007) e Silva *et al.* (2008) reforçam que os atributos físicos do solo são altamente sensíveis às intervenções humanas, como o revolvimento mecânico, a ausência de cobertura vegetal e o pisoteio animal. A degradação da estrutura do solo pode ocorrer de forma progressiva e silenciosa, levando à formação de crostas superficiais, à compactação em subsuperfície e à perda da conectividade porosa. Essas alterações comprometem diretamente a capacidade do solo de captar e reter água, além de afetar o comportamento térmico e a troca gasosa no sistema radicular, criando condições desfavoráveis ao crescimento das plantas.

Para medir e interpretar a qualidade física do solo, torna-se necessário o uso de indicadores específicos capazes de traduzir, por meio de variáveis mensuráveis, o estado estrutural e funcional do solo. Entre esses indicadores, destaca-se a textura do solo, que corresponde à proporção das partículas primárias — areia, silte e argila — e exerce influência direta sobre a resistência do solo, a dinâmica da água, o esforço mecânico necessário ao manejo e diversos processos ecológicos, como a ciclagem de nutrientes e as trocas iônicas (Stefanoski *et al.*, 2013).

No entanto, por se tratar de uma característica intrínseca do solo e pouco modificada pelas práticas de manejo, a textura não é considerada um indicador adequado para comparações diretas entre diferentes sistemas de uso do solo (Cherubin *et al.*, 2016).

Figura 1. Fluxograma dos principais Indicadores físicos do solo



Fonte: Adaptado de Santos *et al.*, 2024

A textura do solo é um fator essencial para compreender sua resistência e resiliência diante de práticas agrícolas específicas (Silva *et al.*, 2010). Solos argilosos, compostos por partículas finas, apresentam maior quantidade de microporos, o que reduz a taxa de infiltração, mas aumenta a capacidade de retenção de água (Brady; Weil, 2013; He *et al.*, 2014).

De acordo com o NRCS (2014), a menor taxa de respiração dos solos argilosos favorece a proteção da matéria orgânica contra a decomposição e a mineralização do nitrogênio orgânico. Já os solos arenosos, caracterizados por maior proporção de macroporos, permitem rápida infiltração da água, resultando em baixa retenção hídrica (Reichardt; Timm, 2012).

Entretanto, a maior permeabilidade dos solos arenosos também favorece a lixiviação de cátions trocáveis para camadas mais profundas, especialmente em regiões de elevada precipitação pluvial (Ronquim, 2010; Henrique, 2019). Além disso, a menor coesão entre as partículas de areia aumenta a suscetibilidade desses solos à erosão, exigindo a adoção de práticas de manejo adequadas para minimizar perdas (Zonta, 2011). Embora a textura do solo não seja diretamente alterada pelo manejo, ela exerce papel fundamental na dinâmica da água e dos nutrientes, bem como na resistência do solo às operações agrícolas. Assim, seu conhecimento é indispensável para a implementação de estratégias sustentáveis e eficientes no uso da terra.

Além da textura, a estrutura do solo constitui outro componente essencial para a compreensão de seu comportamento físico em ambientes agrícolas. Em contextos nos quais a superfície do solo está frequentemente sujeita a distúrbios mecânicos, tráfego de máquinas, pisoteio animal e ausência de cobertura vegetal, compreender o comportamento dos agregados torna-se fundamental para o diagnóstico de processos de degradação ou para a avaliação da eficácia de práticas conservacionistas. Segundo Hickmann *et al.* (2011), a estrutura do solo é um dos atributos centrais para os métodos de cultivo, sendo que a manutenção da estabilidade dos agregados está diretamente relacionada à obtenção de produtividades elevadas de forma sustentável.

Solos com agregados de maior tamanho e maior estabilidade apresentam maior eficiência estrutural, pois promovem a circulação de água e ar, facilitam a penetração das raízes e contribuem para a proteção da matéria orgânica contra a rápida decomposição. De acordo com Calonego e Rosolem (2008) e Salton *et al.* (2008), a presença de macroporos entre os agregados favorece a infiltração de água e as trocas gasosas, enquanto a microporosidade interna dos próprios agregados contribui para a retenção de umidade e para a regulação

térmica. Dessa forma, a qualidade estrutural do solo depende não apenas da presença de agregados, mas também da capacidade desses agregados de resistirem à ação da chuva, do manejo e de outras perturbações.

A estabilidade dos agregados, contudo, não é uma propriedade estática. Ela varia conforme as características intrínsecas do solo, como textura e teor de argila, e principalmente conforme o tipo de uso e manejo adotado ao longo do tempo. Panachuki *et al.* (2011) destacam que solos cultivados, especialmente sob sistemas convencionais, tendem a apresentar fragmentação progressiva dos agregados, com redução do volume de macroporos, aumento de microporos e elevação da densidade do solo. Tais alterações afetam negativamente a capacidade de infiltração e favorecem a ocorrência de processos erosivos, mesmo sob chuvas de baixa intensidade.

Diante desse cenário, a adoção de sistemas de manejo capazes de promover agregados mais estáveis torna-se um dos principais objetivos das práticas de conservação do solo. Esses sistemas, ao preservarem ou aumentarem a coesão entre as partículas, mantêm a estrutura estável mesmo quando submetida a forças externas, como o impacto das gotas de chuva, o tráfego de equipamentos ou o pisoteio de animais. Além disso, solos bem agregados oferecem maior resistência à ação erosiva da água, reduzindo as perdas superficiais de solo e nutrientes (Salton *et al.*, 2008).

Por outro lado, sistemas de manejo caracterizados por elevado grau de revolvimento mecânico do solo têm sido apontados como importantes agentes de degradação estrutural das camadas superficiais. Argenton *et al.* (2005) observaram que o uso intensivo de implementos agrícolas compromete significativamente a estrutura do solo, favorecendo a formação de crostas compactadas e reduzindo a capacidade de infiltração. Esse tipo de revolvimento também acelera a decomposição da matéria orgânica, uma vez que a quebra dos agregados expõe seu conteúdo ao ataque microbiano, intensificando o processo de mineralização e reduzindo a estabilidade estrutural (Wendling *et al.*, 2005).

Em contrapartida, sistemas conservacionistas de manejo do solo, especialmente aqueles baseados no plantio direto e na manutenção de resíduos vegetais sobre a superfície, têm demonstrado elevada eficácia na preservação da estrutura agregada. Vezzani e Mielniczuk (2011) destacam que, nesses sistemas, os agregados permanecem física e quimicamente protegidos, com compostos orgânicos menos acessíveis aos microrganismos e maior interação entre a matéria orgânica e os minerais do solo. A continuidade do manejo conservacionista favorece a formação de agregados maiores e mais estáveis, com auxílio da ação mecânica das

raízes e das hifas fúngicas, que atuam como agentes estruturantes ao entrelaçar e incorporar materiais orgânicos e inorgânicos ao complexo de agregados (Salton *et al.*, 2008).

A mensuração do tamanho e da estabilidade dos agregados pode ser realizada por diferentes metodologias, sendo os parâmetros mais utilizados o diâmetro médio ponderado (DMP), o diâmetro médio geométrico (DMG) e o índice de estabilidade de agregados (IEA), conforme estabelecido por Kemper e Chepil (1965).

O DMP representa a média ponderada dos diâmetros dos agregados, indicando a proporção de agregados maiores retidos nas peneiras. Já o DMG corresponde a uma estimativa mais representativa do tamanho de agregados predominante na amostra analisada, expressando a dominância de determinadas classes estruturais. O IEA, por sua vez, constitui um índice sintético da estabilidade estrutural total do solo, avaliando a resistência dos agregados à ação mecânica ou hídrica (Kemper e Chepil, 1965).

Outro indicador frequentemente utilizado é o AGRI, que representa a porcentagem de agregados com diâmetro superior a 2,0 mm, sendo considerado um indicativo de maior estabilidade estrutural superficial (Castro Filho *et al.*, 1998; Hickmann *et al.*, 2011). A escolha entre esses índices depende dos objetivos específicos do estudo, das condições edafoclimáticas e do histórico de uso da área analisada. Em conjunto, a análise integrada desses indicadores fornece informações relevantes sobre a qualidade estrutural do solo e sua resposta às práticas de manejo.

Entre os indicadores físicos do solo, destaca-se ainda a densidade do solo, considerada uma das variáveis mais relevantes para avaliar a compactação e a qualidade estrutural em diferentes sistemas de uso e manejo. Esse parâmetro expressa a relação entre a massa do solo seco e o volume que ocupa, sendo sensível, de fácil mensuração e fortemente correlacionado à porosidade total, bem como à capacidade do solo de sustentar a vida vegetal. Alterações na densidade estão frequentemente associadas ao grau de compactação, limitando processos essenciais como a penetração das raízes, a infiltração de água e a troca gasosa entre o solo e a atmosfera (Mota *et al.*, 2013).

Fatores como cobertura vegetal e presença de resíduos orgânicos na superfície atuam diretamente na proteção do solo contra impactos externos, contribuindo para menor compactação nas camadas mais superficiais (Ferreira, 2016). Nesse contexto, a matéria orgânica exerce papel mitigador relevante, ao conferir maior estabilidade estrutural, reduzir a densidade aparente e aumentar a porosidade total. Entretanto, como demonstrado por Martins e Augusto (2012) e Brady e Weil (2013), o conteúdo de matéria orgânica tende a decrescer

com a profundidade, favorecendo um gradiente natural de aumento da densidade do solo, que pode ser intensificado pelas atividades antrópicas.

Esse comportamento vertical da densidade do solo torna-se ainda mais crítico em áreas destinadas à pecuária extensiva. Em ambientes onde o solo é submetido ao pisoteio constante do gado, forma-se frequentemente uma camada superficial compactada que atua como barreira física à infiltração de água e à emergência de plântulas. Segundo Araújo *et al.* (2019), a conversão da vegetação nativa em pastagens na Amazônia Oriental resulta em degradação estrutural significativa do solo, com aumento da densidade aparente em relação às áreas sob floresta original.

Em estudo anterior, Araújo *et al.* (2011) demonstraram que a conversão de florestas em áreas de pastagem resultou em aumento de aproximadamente 26% na densidade do solo, atribuído à compactação causada pelo pisoteio animal e à remoção do horizonte A pela erosão.

A perda dessa camada superficial, rica em matéria orgânica, nutrientes e microrganismos, constitui um dos sinais mais evidentes de degradação física do solo. Além disso, a compactação reduz o volume de solo explorável pelas raízes, limitando o acesso das plantas à água e aos nutrientes e tornando-as mais vulneráveis ao estresse hídrico e às variações climáticas sazonais.

Nesse contexto, a dinâmica da água no solo torna-se um elemento central para compreender a funcionalidade física do sistema. Segundo Bocuti *et al.* (2020), a condutividade hidráulica do solo é um dos indicadores mais reveladores de sua funcionalidade, pois expressa a forma como a água se movimenta entre os poros e até que ponto o solo permite sua passagem sob diferentes condições de saturação. De maneira semelhante, Gonçalves e Libardi (2013) destacam que a condutividade hidráulica saturada (Ksat) representa o comportamento máximo do fluxo em regime de saturação, refletindo a interação entre textura, estrutura, porosidade e manejo.

A condutividade hidráulica saturada não constitui uma variável isolada, mas reflete a forma como o solo foi historicamente utilizado e transformado. Em solos naturais, a presença de macroporos bem conectados — formados por raízes, organismos do solo e pela própria estrutura agregada — assegura condutividades elevadas, favorecendo a infiltração e reduzindo o escoamento superficial. Contudo, alterações no uso da terra, mecanização intensiva ou compactação causada pelo pisoteio animal podem eliminar ou desconectar esses poros, modificando significativamente a dinâmica da água no solo. Como destacam Almeida *et al.* (2017), a água que não infiltra tende a escoar superficialmente, transportando partículas do

solo e nutrientes e comprometendo a estabilidade ecológica.

A classificação proposta por Freire *et al.* (2003) organiza a condutividade hidráulica saturada em sete classes, variando de “muito rápida” a “muito lenta”, permitindo relacionar os valores obtidos em campo a interpretações práticas de manejo agrícola e ambiental. No entanto, é importante considerar o contexto de formação desses valores, uma vez que solos distintos podem apresentar taxas semelhantes de infiltração por razões diferentes.

A compreensão da condutividade hidráulica pode ser aprimorada com a escolha adequada dos métodos de análise. Em muitas situações, testes de campo apresentam maior representatividade do que ensaios laboratoriais, por captarem as condições estruturais reais do solo *in situ* (Penner *et al.*, 2019). Nesse sentido, o uso de permeâmetros, de carga constante ou variável, deve considerar as particularidades do solo analisado.

Entre os métodos de campo disponíveis, destaca-se o método Beerkan, que se apresenta como alternativa prática e robusta para estimar parâmetros hidráulicos do solo. Segundo Haverkamp *et al.* (1994), esse método integra medições simples de infiltração e granulometria para estimar parâmetros hidráulicos com elevada confiabilidade. Baseado em formulações semiempíricas, como as propostas por van Genuchten (1980) e Brooks e Corey (1964), o método apresenta vantagens relacionadas à precisão, ao baixo custo e à aplicabilidade em contextos com infraestrutura limitada (Santos *et al.*, 2012).

Essas análises evidenciam que a condutividade hidráulica é, em grande medida, reflexo da arquitetura interna do solo. Shah *et al.* (2017) destacam que os macroporos são responsáveis pela maior parte do fluxo de água sob condições de saturação, sendo controlados por fatores biológicos e estruturais. Dessa forma, reduções na K_{sat} após anos de uso agrícola intensivo podem indicar processos de degradação estrutural e perda de funcionalidade hidrológica.

Pesquisas recentes têm aprofundado essas relações. Estudos como os de Alagna *et al.* (2018), Hara *et al.* (2019) e Zieba (2017) demonstram que fatores como compactação superficial, ausência de cobertura orgânica e redução da biodiversidade do solo afetam diretamente a eficiência do fluxo hídrico. Trabalhos como os de Neto *et al.* (2017) e Scholl *et al.* (2014) indicam ainda que intervenções aparentemente pontuais, como o tráfego sazonal de máquinas, podem produzir efeitos prolongados na condutividade do solo.

A variabilidade da K_{sat} no tempo e no espaço constitui, portanto, um desafio metodológico relevante. Junqueira *et al.* (2018) destacam que a obtenção de dados representativos exige estratégias de amostragem cuidadosas e análises estatísticas capazes de

considerar essa heterogeneidade. Mais recentemente, a combinação entre modelagem matemática e sensoriamento remoto tem ampliado a capacidade de estimar a Ksat em escalas maiores, embora a calibração desses modelos ainda dependa de medições realizadas em campo.

A infiltração, por sua vez, representa um dos processos hidrológicos mais determinantes para o funcionamento dos ecossistemas terrestres, especialmente em ambientes tropicais, como os do sul da Amazônia. Segundo Nery *et al.* (2017), a infiltração corresponde ao movimento da água proveniente das precipitações através da superfície do solo, contribuindo para a formação das reservas hídricas disponíveis para plantas e microrganismos.

Durante o processo de infiltração, observa-se uma dinâmica não linear. De acordo com Vilarinho *et al.* (2019), a infiltração tende a ser elevada no início do evento, diminuindo gradualmente até atingir um regime permanente, à medida que as camadas superficiais do solo se aproximam da saturação. Esse comportamento é altamente sensível às condições estruturais do solo, à presença de cobertura vegetal e ao grau de compactação superficial.

A importância desse fenômeno ultrapassa os limites da hidrologia básica, pois regula a disponibilidade de água na zona radicular e influencia diretamente a produtividade agrícola. Solos com baixa taxa de infiltração apresentam maior propensão à erosão, ao assoreamento de cursos d'água e à perda de nutrientes (Horton, 1933; Morgan, 2005; Barcelos; Cassol; Denardin, 1999). Dessa forma, o monitoramento da infiltração constitui prática essencial para o manejo conservacionista e para a manutenção da qualidade do solo.

Diversos fatores condicionam a dinâmica da infiltração, entre eles as características da superfície do solo e a organização de suas propriedades físicas ao longo do perfil. Conforme Gonçalves e Moraes (2012), a cobertura vegetal protege o solo contra o impacto direto das gotas de chuva, favorecendo a infiltração e prevenindo a formação de crostas superficiais. Em contrapartida, a ausência dessa cobertura e o pisoteio animal tendem a promover compactação superficial e reduzir a capacidade de infiltração (Santos *et al.*, 2014).

Entre as propriedades intrínsecas do solo que influenciam esse processo destacam-se a textura e a estrutura. Solos arenosos, por apresentarem elevada macroporosidade, tendem a apresentar infiltração mais rápida, enquanto solos argilosos apresentam infiltração mais lenta, porém maior capacidade de retenção de água (Nery *et al.*, 2017). A estrutura do solo, por sua vez, relaciona-se à disposição dos agregados e à presença de canais preferenciais, que determinam a continuidade e a eficiência do fluxo hídrico.

Assim, o estudo da taxa de infiltração assume papel diagnóstico fundamental,

funcionando como indicador sensível das transformações provocadas pelo uso e manejo da terra. Conforme destacam Vilarinho *et al.* (2019), a conversão de florestas em áreas agrícolas altera significativamente o regime de infiltração, reduzindo a recarga hídrica e aumentando a suscetibilidade à erosão. Essas evidências reforçam a necessidade de práticas conservacionistas voltadas à preservação da estrutura do solo e da dinâmica natural da água.

3.4 Alterações no Uso Da Terra

A trajetória de ocupação do território brasileiro resulta de processos históricos marcados pela expansão desordenada e pela exploração intensiva dos recursos naturais. Desde o período colonial, essa expansão esteve associada à busca por subsistência e à ocupação de terras por populações rurais sem acesso formal à propriedade, o que contribuiu para a formação de paisagens heterogêneas e, muitas vezes, marcadas por conflitos socioambientais.

No contexto amazônico, essa dinâmica torna-se ainda mais evidente, uma vez que a região historicamente desperta interesse político e econômico devido às suas vastas riquezas naturais e ao potencial de expansão territorial. Por essa razão, a Amazônia passou a ser frequentemente interpretada como uma das últimas fronteiras de desenvolvimento do país (Becker, 2004).

A expansão territorial no Brasil deu origem a diferentes fronteiras de ocupação que, ao longo do tempo, estimularam a interiorização das atividades econômicas e provocaram profundas alterações nos ecossistemas naturais. Essa dinâmica resultou em impactos ambientais significativos, sobretudo relacionados às mudanças no uso e na cobertura do solo. Segundo Becker (2010) e Araújo *et al.* (2019), tais transformações ultrapassam o campo técnico e econômico, configurando fenômenos de natureza social e política que influenciam diretamente a estabilidade dos sistemas ecológicos e a qualidade ambiental, especialmente na Amazônia.

A partir do século XX, o Brasil passou a sistematizar estudos específicos sobre o uso da terra, destacando-se a atuação de instituições como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e diversas universidades públicas e privadas. Essas instituições desempenham papel estratégico na produção de dados e diagnósticos sobre as dinâmicas territoriais, subsidiando políticas públicas, zoneamentos ecológico-econômicos e estratégias de ordenamento territorial (IBGE, 2013). Apesar desses avanços, ainda persiste o desafio de integrar tais informações aos processos decisórios locais, que frequentemente

permanecem distantes das evidências científicas e acabam orientados por interesses econômicos imediatistas.

Nesse contexto, diversos estudos demonstram que as mudanças no uso e no manejo da terra provocam alterações significativas — e, muitas vezes, irreversíveis — nas propriedades físicas e hidráulicas do solo. A conversão de ecossistemas naturais em áreas agrícolas ou pastoris modifica a estrutura do solo, reduz sua condutividade hidráulica, favorece a compactação e intensifica processos erosivos. Tais efeitos resultam do desequilíbrio provocado pela substituição da cobertura vegetal e pelo manejo inadequado, comprometendo a funcionalidade hidrológica e a capacidade de autorregulação dos sistemas edáficos (Zhang *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2017).

A remoção da cobertura vegetal, associada à compactação provocada pelo pisoteio de animais ou pelo tráfego de maquinário pesado, tende a reduzir significativamente a infiltração de água e a capacidade de retenção hídrica do solo. Essas alterações estruturais desencadeiam mudanças relevantes nos padrões de escoamento superficial, favorecendo a ocorrência de inundações, o assoreamento de cursos d'água e a intensificação de processos erosivos. Conforme destacam Foley *et al.* (2005), tais modificações diminuem a capacidade do solo de regular o ciclo hidrológico e comprometem suas funções ecológicas.

Nesse sentido, Verburg *et al.* (2015) afirmam que as mudanças no uso da terra afetam diretamente a disponibilidade de água para as plantas e reduzem a resiliência dos ecossistemas, gerando impactos significativos sobre a biodiversidade e a produtividade agrícola.

As preocupações com a degradação dos solos são amplamente justificadas por levantamentos da FAO (2015), segundo os quais mais de 30% dos solos do planeta encontram-se degradados em diferentes graus, afetados por processos como erosão, salinização, compactação, acidificação e contaminação. Esses fenômenos comprometem não apenas a qualidade ambiental, mas também a segurança alimentar global, uma vez que impactam diretamente a produtividade agrícola. Ainda de acordo com o relatório, a perda anual de capacidade produtiva representa cerca de 0,3% da produção mundial de alimentos, podendo ultrapassar 10% até 2050 caso o ritmo atual de degradação se mantenha.

Diante desse cenário, compreender as mudanças no uso da terra torna-se fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável que conciliem a produção agrícola com a conservação dos recursos naturais. Conforme destacam Jiang *et al.* (2016), estudos sobre essa temática contribuem para a formulação de políticas públicas voltadas à

proteção da biodiversidade e à manutenção do equilíbrio ambiental, especialmente em regiões ambientalmente sensíveis, como a Amazônia.

a) Pastagem

Os ecossistemas de pastagem constituem uma das formas mais comuns de uso da terra no Brasil, especialmente em áreas de expansão agropecuária, como o sul da Amazônia. A elevada incidência de degradação das pastagens brasileiras evidencia a importância de compreender como os atributos físicos e químicos do solo respondem às pressões decorrentes da atividade de pastejo. Identificar os mecanismos que levam à deterioração dessas propriedades é fundamental para subsidiar práticas de manejo voltadas à recuperação e à conservação da qualidade do solo em sistemas pastorais (Parente; Maia, 2011).

Figura 2. Sistema cultivado de pastagem.



Fonte: Autor (2025)

Compreender as interações entre o pastejo e a dinâmica edáfica é essencial para identificar as principais causas da degradação e, consequentemente, adotar práticas de manejo que promovam a recuperação e a sustentabilidade dessas áreas. A literatura reforça que práticas inadequadas, como o superpastejo e a ausência de rotação de pastagens, aceleram a degradação, enquanto o manejo racional, baseado em critérios técnicos, pode mitigar esses efeitos e garantir a manutenção da capacidade produtiva em longo prazo (Parente; Maia, 2011).

Nesse sentido, a adoção de técnicas como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), a adubação de pastagens e o controle do tráfego animal são estratégias que vêm sendo defendidas como alternativas para a reversão do quadro atual de degradação e para a promoção de sistemas mais resilientes e sustentáveis.

b) Açaí

O cultivo do açaí apresenta uma cadeia produtiva abrangente, que envolve etapas de plantio, colheita, beneficiamento e comercialização, consolidando-se como um dos segmentos de maior relevância nos mercados nacional e internacional. O fruto do açaizeiro, amplamente consumido na forma de polpa, destaca-se por suas propriedades nutricionais e pelo potencial de aproveitamento nas indústrias alimentícia e cosmética, fatores que têm impulsionado o aumento da demanda e, conseqüentemente, a expansão das áreas de cultivo (Bezerra; Freitas-Silva; Damasceno, 2016).

O açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma espécie de palmeira nativa do Brasil, amplamente distribuída em áreas de várzea e florestas inundáveis da região Amazônica. Essa planta exerce papel ecológico fundamental, participando da estruturação dos ecossistemas alagados e contribuindo para a oferta de alimento e habitat a diversas espécies da fauna local (Minighin *et al.*, 2020). Além de sua importância ecológica, o açaizeiro tem grande importância socioeconômica, configurando-se como uma das principais fontes de sustento para populações tradicionais e ribeirinhas da região amazônica.

Essa valorização econômica tem promovido a intensificação do manejo do açaí, muitas vezes com a adoção de práticas que incluem o plantio em sistemas homogêneos, o uso de adubação química e a irrigação regular, especialmente em áreas de terra firme fora das várzeas naturais.

Figura 3. Cultivo do Açaí (*Euterpe oleracea* Mart)



Fonte: Autor (2025)

A introdução do açaizeiro em áreas de terra firme representa uma alternativa promissora para a recuperação de ambientes anteriormente desmatados, além de contribuir para reduzir a pressão antrópica sobre as regiões de várzea, que possuem elevada sensibilidade ecológica (Jesus *et al.*, 2021). Embora essa prática apresente potencial para gerar benefícios econômicos e ambientais, é fundamental reconhecer que o manejo inadequado pode comprometer as propriedades físicas do solo, ocasionando compactação, diminuição da infiltração de água e alterações nos fluxos hidrológicos.

c) Macaxeira

A macaxeira (*Manihot esculenta* Crantz) é uma cultura de grande importância estratégica para o Brasil, destacando-se pela ampla adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas e pela contribuição significativa à segurança alimentar e à geração de renda. A espécie apresenta elevada tolerância a solos ácidos e de baixa fertilidade, bem como à irregularidade pluviométrica e aos períodos de estiagem, características recorrentes em regiões amazônicas. Sua rusticidade e baixa exigência nutricional consolidam a macaxeira como uma alternativa produtiva e resiliente, especialmente para pequenos agricultores, que nela encontram uma fonte estável e acessível de subsistência (Ajayi; Olutumise, 2018).

Figura 4. Cultivo de macaxeira (*Manihot esculenta* Crantz).



Fonte: Autor (2025)

No Brasil, a produção de macaxeira continua desempenhando papel central na alimentação e na economia, sendo cultivada em diversas regiões e utilizada em múltiplas formas, como raiz fresca, farinha e fécula. A cultura integra cadeias produtivas que envolvem os setores alimentício, farmacêutico e energético, contribuindo significativamente para a

geração de empregos diretos e indiretos, além de fornecer subsídios econômicos importantes para as comunidades rurais (Conab, 2023).

Na região Amazônica, a macaxeira assume uma função ainda mais simbólica, configurando-se como um dos principais alimentos consumidos pela população, especialmente nas comunidades ribeirinhas e tradicionais. A farinha de macaxeira, resultado do processamento artesanal da raiz, integra o cotidiano alimentar e cultural dessas populações, consolidando-se como um elemento identitário e patrimonial (Jesus *et al.*, 2021). Contudo, o cultivo da macaxeira, quando realizado de forma intensiva e sem práticas conservacionistas, pode induzir processos de degradação do solo, como a perda de matéria orgânica, a compactação e a diminuição da capacidade de infiltração de água. Assim, torna-se imprescindível fomentar práticas agrícolas sustentáveis e manejos adequados que permitam não apenas a manutenção da produtividade, mas também a conservação das funções ecossistêmicas dos solos amazônicos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

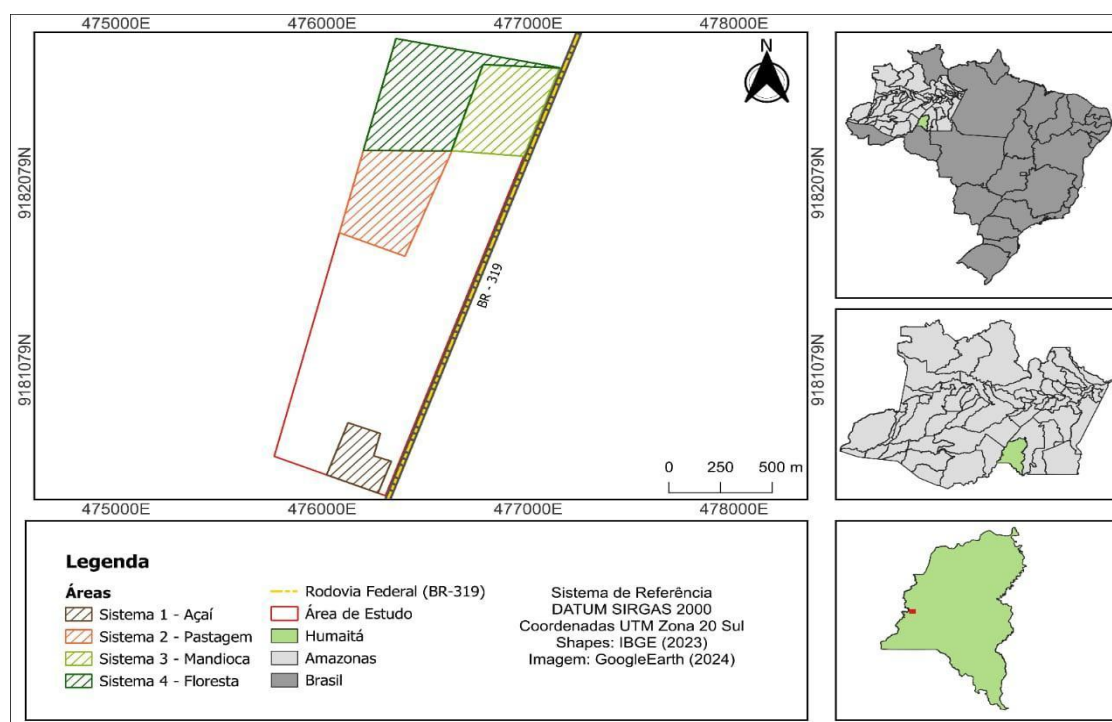
4.1 Áreas De Estudo

O presente estudo foi conduzido no município de Humaitá, localizado no sul do estado do Amazonas (Figura 5), na região jusante do rio Madeira. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), o município possui uma população estimada em 57.473 habitantes.

O clima local enquadra-se, conforme a classificação de Köppen, no tipo tropical chuvoso com breve estação seca, apresentando temperaturas médias anuais entre 25 °C e 27 °C. A precipitação anual varia entre 2.250 mm e 2.500 mm, com predominância da estação chuvosa entre os meses de outubro e junho, característica marcante da dinâmica climática regional (Alvares *et al.*, 2013).

A umidade relativa do ar mantém-se elevada ao longo do ano, variando entre 85% e 90%, o que contribui significativamente para o ambiente úmido que caracteriza a paisagem local. A altitude média do município é de aproximadamente 90 metros acima do nível do mar, fator que também influencia as condições climáticas e ambientais da região, constituindo um parâmetro relevante para a compreensão das características edáficas e hidrológicas da área (Carvalho, 1986; Embrapa, 1997).

Figura 5. Mapa de localização da área experimental; pastagens, floresta, macaxeira e açaí.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

A Figura 5 apresenta a localização espacial das quatro áreas de estudo, distribuídas ao longo da BR-319, no município de Humaitá. Cada sistema de uso do solo foi devidamente demarcado, correspondendo aos seguintes tipos: cultivo de açaí, pastagem, macaxeira e floresta nativa, conforme indicado na legenda.

A representação cartográfica evidencia a disposição geográfica desses sistemas em relação à rodovia, permitindo visualizar sua distribuição no território e o contexto espacial da pesquisa. Dessa forma, o mapa destaca a inserção das áreas analisadas no sul do estado do Amazonas, conforme detalhado nos mapas de localização apresentados.

4.2 Histórico da Ocupação e Manejo do Solo

A pesquisa foi conduzida na região sul do estado do Amazonas, um território marcado por intensas transformações na cobertura e no uso do solo ao longo das últimas décadas. Nesse contexto, foram selecionadas quatro áreas distintas para a realização das análises comparativas, definidas a partir de critérios técnicos que consideraram tanto o tipo de manejo a que cada área é submetida quanto sua representatividade no contexto socioeconômico e ambiental local.

Três dessas áreas encontram-se sob uso antrópico, caracterizadas, respectivamente, pelo cultivo de açaí, pelo plantio de macaxeira e pela formação de pastagens — sistemas produtivos que desempenham papel central na dinâmica agrícola da região. Para fins comparativos, foi selecionada também uma área de floresta natural, preservada em suas condições originais, utilizada como referência para avaliar os impactos das mudanças no uso do solo sobre as propriedades físicas e hidráulicas do solo.

A escolha dessas quatro áreas não foi aleatória, mas estrategicamente orientada para representar a diversidade de práticas de manejo presentes na região e suas possíveis implicações ambientais. O cultivo de açaí, por exemplo, constitui um sistema agroflorestal de crescente importância econômica na Amazônia, que, embora promova benefícios produtivos, pode também acarretar alterações na estrutura do solo, especialmente quando associado a práticas intensivas de irrigação e adubação.

O plantio de macaxeira, por sua vez, tradicionalmente realizado com preparo mecânico do solo, envolve práticas como a gradagem, que, quando não manejadas adequadamente, podem favorecer processos de compactação e degradação física do solo. Já as áreas de pastagem, com seu histórico prolongado de uso, configuram-se como um dos principais

vetores de transformação da paisagem amazônica, frequentemente associadas à compactação superficial, à redução da infiltração de água e ao aumento dos processos erosivos.

Em contraste com essas áreas sob uso antrópico, a floresta natural preservada constitui um referencial fundamental para a análise comparativa, uma vez que conserva atributos edáficos e hidrológicos que tendem a ser significativamente modificados pelos diferentes tipos de manejo. Dessa forma, a seleção dessas áreas de estudo busca não apenas compreender os efeitos isolados de cada tipo de uso da terra, mas também analisar, de maneira integrada, como a trajetória de ocupação e manejo influencia os processos físicos e hidráulicos do solo na região sul do Amazonas.

Tabela 1. Áreas sob pastagem, macaxeira, açaí e floresta na região sul do Amazonas

Áreas de estudos	Histórico de manejo
Floresta	Floresta Tropical Ombrófila Densa é uma vegetação perene, formada por árvores de diferentes tamanhos e camadas composta por árvores de 20 a 50 metros de altura, dispostas em camadas multe estratificadas.
Pastagem	Encontra-se com 25 a 38 anos de manejo em pasto reformado, práticas de calagem, porém sem a aplicação de adubação.
Açaizal	O sistema de cultivo de açaí (<i>E. oleracea</i>) é manejado há cerca de 15 anos, com práticas de adubação anual e irrigação regular da área, por gotejamento.
Macaxeiral	O cultivo tem cerca de três anos de cultivo, com a prática de gradagem realizada antes do plantio.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

A Tabela 1 sintetiza, de maneira clara e objetiva, o histórico de uso e as características de manejo das quatro áreas investigadas neste estudo, fornecendo subsídios importantes para a interpretação dos resultados obtidos. A área de floresta (Figura 6), descrita como Floresta

Tropical Ombrófila Densa, apresenta uma estrutura multiestratificada, com árvores que alcançam entre 20 e 50 metros de altura, organizadas em diferentes estratos e formando um sistema complexo de interações ecológicas. Essa heterogeneidade estrutural é fundamental para a manutenção da qualidade física do solo, pois favorece a proteção contra a erosão, promove a infiltração de água e regula a ciclagem de nutrientes por meio da deposição de serapilheira e da intensa atividade biológica.

Figura 6. Área de floresta.



Fonte: Autor (2025)

Em contraste, a área de pastagem apresenta um longo histórico de uso, com práticas de manejo que remontam a um período entre 21 e 38 anos. Apesar da adoção de práticas de calagem, utilizadas para corrigir a acidez do solo, não se verificou a aplicação regular de adubação, o que pode ter contribuído para a exaustão gradual dos nutrientes e para a degradação da qualidade edáfica. A ausência de adubação, associada ao uso contínuo para pastejo, tende a intensificar processos de compactação superficial, reduzir a infiltração de água e favorecer a formação de camadas adensadas, limitando a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas forrageiras.

O sistema de cultivo de açaí, manejado há aproximadamente 12 anos, destaca-se pela adoção de práticas mais intensivas, como a adubação anual e a irrigação regular por gotejamento. Embora tais práticas tenham como objetivo aumentar a produtividade, é importante considerar que elas podem alterar significativamente as propriedades físicas do solo, especialmente no que se refere à sua estrutura e à capacidade de infiltração. A irrigação

localizada, quando não manejada adequadamente, pode gerar zonas de saturação ou compactação, enquanto a adubação contínua pode modificar o equilíbrio químico e biológico do solo, influenciando sua estabilidade estrutural.

A área cultivada com macaxeira representa um sistema de uso mais recente, com aproximadamente três anos de implantação. A prática de gradagem realizada antes do plantio, embora facilite o preparo inicial do solo, pode comprometer sua estrutura a médio e longo prazo, promovendo a fragmentação dos agregados, a diminuição da porosidade e o aumento do risco de compactação. Esses efeitos tornam-se particularmente relevantes em solos amazônicos, que, em geral, apresentam elevada sensibilidade à perturbação mecânica.

A proximidade dessas áreas com uma floresta nativa preservada oferece um contexto favorável para a realização de análises comparativas, permitindo avaliar não apenas os impactos diretos das diferentes práticas de manejo sobre as propriedades físicas e hidráulicas do solo, mas também identificar possíveis estratégias de manejo sustentável e conservação ambiental. Dessa forma, a diversidade de sistemas analisados proporciona uma visão abrangente das dinâmicas de uso da terra na região, contribuindo para a compreensão das relações entre produção agrícola, conservação dos recursos naturais e manutenção da qualidade ambiental.

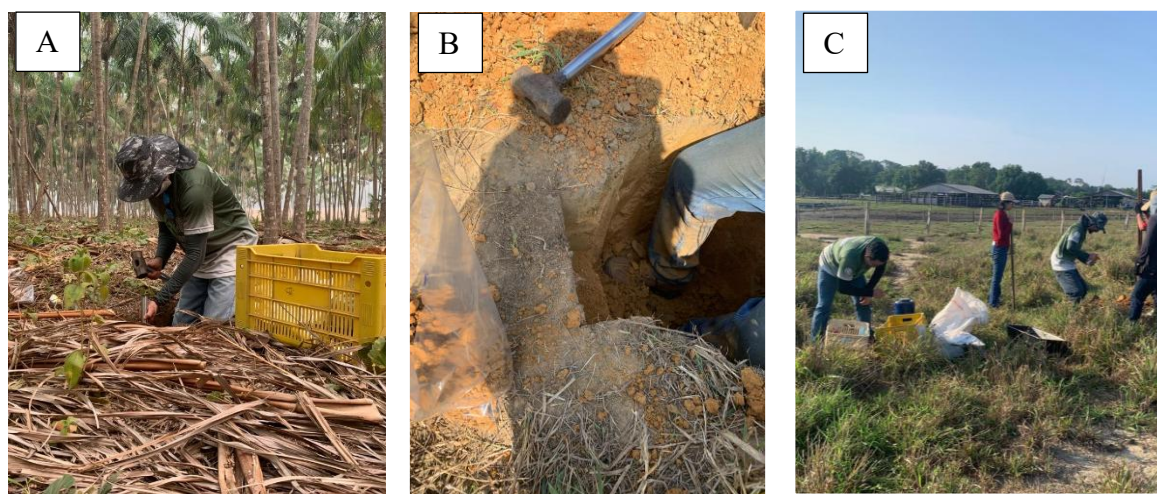
4.3 Atividade de Campo

A execução das atividades de campo constituiu uma etapa fundamental deste estudo, pois possibilitou a coleta de dados primários diretamente nas quatro áreas representativas dos diferentes usos da terra: floresta, açail, macaxerial e pastagem. Essas áreas foram estrategicamente selecionadas não apenas pela diversidade de manejos, mas também por estarem localizadas em uma mesma posição topográfica, o que permitiu minimizar variáveis associadas a fatores como declividade ou exposição solar, que poderiam interferir nas análises comparativas entre os sistemas.

As coletas foram realizadas entre os meses de agosto e outubro de 2024, período caracterizado por transições relevantes no regime hídrico regional, aspecto que reforça a importância dos dados obtidos. Em cada uma das áreas, foram definidos aleatoriamente dez pontos amostrais, assegurando representatividade espacial e evitando vieses decorrentes da seleção subjetiva dos locais de coleta. Essa estratégia de amostragem foi essencial para captar a heterogeneidade natural dos sistemas edáficos, especialmente em ambientes com diferentes formas de uso e manejo do solo.

Em cada ponto amostral, procedeu-se à abertura de trincheiras (Figura 7 a, b e c), respeitando as profundidades de 0–20 cm, 20–40 cm e 40–60 cm. A escolha dessas faixas de profundidade foi orientada pela necessidade de compreender a variabilidade vertical dos atributos físicos e hídricos do solo, considerando que diferentes práticas de manejo podem afetar de forma distinta cada horizonte do perfil edáfico.

Figura 7. Abertura de trincheiras. 7A) Trincheira na plantação de acaí; 7B) e 7C) Trincheira em área de pastagem de gado bovino.



Fonte: Autor (2025)

De cada trincheira foram coletadas três amostras correspondentes às respectivas profundidades, totalizando 30 amostras por sistema de uso da terra. Ao final da etapa de campo, obteve-se um conjunto de 120 amostras de solo levemente alteradas, também denominadas torrões, cuja integridade estrutural foi cuidadosamente preservada para garantir que os resultados laboratoriais representassem fielmente as condições naturais do solo.

Para a coleta das amostras foram utilizados anéis volumétricos (Figura 8), instrumentos fundamentais para a obtenção de amostras com volume conhecido e forma padronizada, permitindo análises posteriores com elevado grau de precisão e comparabilidade. O uso desses anéis possibilitou avaliar atributos físicos clássicos, como densidade e porosidade do solo, além de viabilizar testes relacionados à dinâmica hídrica, aspectos centrais para os objetivos deste estudo. Dessa forma, a etapa de campo não apenas assegurou o rigor metodológico da pesquisa, mas também estabeleceu a base empírica necessária para as análises e interpretações subsequentes.

Figura 8. Anéis volumétricos com solos dos ambientes analisados.



Fonte: Autor (2025)

Após a conclusão da etapa de coleta, as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Solos do Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente da Universidade Federal do Amazonas (IEAA/UFAM), ambiente especializado e devidamente equipado para a realização das análises físicas previstas no estudo. A utilização dessa infraestrutura laboratorial garantiu a qualidade técnica das análises e assegurou que todos os procedimentos fossem conduzidos conforme padrões metodológicos consolidados na área de ciência do solo.

4.4 Análises Físicas do Solo

4.4.1 A análise da textura do solo

A análise dos componentes texturais do solo foi realizada pelo método da pipeta, utilizando-se solução de NaOH 0,1 N como agente dispersante. As amostras foram submetidas à agitação em aparelho rotativo, a 50 rpm, durante 16 horas (Figura 9), seguindo os procedimentos descritos por Teixeira *et al.* (2017).

Figura 9. Amostras submetidas a agitação.



Fonte: Autor (2025)

Para a determinação da fração argila, retirou-se de cada amostra um volume de 50 mL da suspensão (Figura 10), o qual foi posteriormente levado à estufa a 105 °C para secagem e, em seguida, pesado em balança digital de precisão.

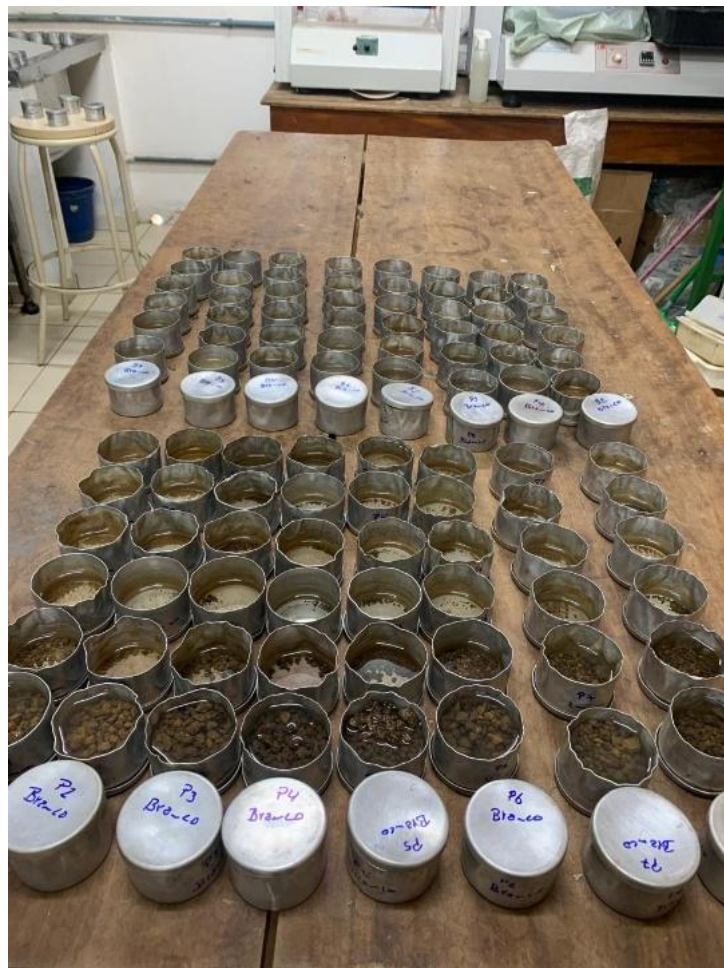
Figura 10. Processo de decantação onde ocorre a separação de misturas heterogêneas



Fonte: Autor (2025)

As frações de areia fina e areia grossa foram separadas por peneiramento, secas em estufa e pesadas para a determinação de sua proporção em massa (Figura 11). O teor de silte foi obtido por diferença, considerando-se as frações de argila e areia em relação à massa inicial de 20 g de solo, conforme a metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017).

Figura 11. Material levado a estufa para secagem



Fonte: Autor (2025)

4.4.2 Estabilidade de agregados

A estabilidade dos agregados foi avaliada segundo o método descrito por Kemper e Chepil (1965), com adaptações nas classes de diâmetro das peneiras: 4,76–2,0 mm; 2,0–1,0 mm; 1,0–0,50 mm; 0,50–0,25 mm; 0,25–0,125 mm e 0,125–0,063 mm. A análise foi conduzida pelo método via úmida, iniciando-se com a imersão dos agregados em água sobre a peneira de 2,0 mm durante 15 minutos. Em seguida, realizou-se a agitação vertical utilizando o aparelho Yoder (Figura 12) (SOLOTEST), com frequência de 32 oscilações por minuto.

Figura 12. Aparelho Yolder (Solotest)



Fonte: Autor (2025)

Após o peneiramento (Figura 13), o material retido em cada peneira foi seco em estufa a 105 °C por 24 horas e, posteriormente, pesado em balança digital de precisão. Os resultados foram expressos em porcentagem de agregados retidos nas classes >2,0 mm, 1,0–2,0 mm e <1,0 mm.

Figura 13. Uma das etapas de peneiramento do material



Fonte: Autor (2025)

O diâmetro médio ponderado (DMP) foi calculado de acordo com a fórmula proposta por Castro Filho *et al.* (1998), enquanto o diâmetro médio geométrico (DMG) foi determinado conforme o método descrito por Schaller e Stockinger (1953), citado por Alvarenga *et al.* (1986), conforme apresentado na Equação 2.

$$DMP = \frac{\sum_t^n}{\sum ni} = 1 niDi$$

(Eq.1) Diâmetro médio geométrico (DMG) proposto por Schaller e Stockinger (1953), citado por Alvarenga *et al.* (1986), (Eq. 2).

$$\frac{\sum_{t=1}^n n_i D_i}{\sum_{t=1}^n n_i} = 10$$

(Eq. 2). Onde:

n_i é a porcentagem de agregados retidos em uma determinada peneira;

D_i é o diâmetro médio de uma determinada peneira;

N é o número de classes de peneiras.

4.4.3 Densidade de porosidade do solo

A densidade do solo (D_s) foi determinada pelo método do cilindro volumétrico (Figura 14). Para isso, amostras foram coletadas em anéis volumétricos de 100 cm³ na camada de 0–20 cm de profundidade, sendo posteriormente pesadas para obtenção da massa e cálculo do volume correspondente. Os procedimentos subsequentes seguiram a metodologia descrita no manual de análise de solos da Embrapa (2017).

Figura 14. Pesagem do anel volumétrico contendo solo de um dos ambientes estudados.



Fonte: Autor (2025)

4.4.4 Umidade gravimétrica e volumétrica do solo

A umidade gravimétrica (Ug) e volumétrica (Uv) de solo foi obtida pela diferença do peso úmido das amostras e peso seco solo seco, conforme a metodologia de Teixeira *et al.* (2017).

4.4.5 Porosidade do solo

A macroporosidade (MaP), mesoporosidade (MeP) e microporosidade (MiP) do solo foram determinadas pelo método da mesa de tensão. Amostras indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos de 100 cm³ e dispostas em bandejas contendo água, de modo que o nível atingisse até dois terços da altura dos anéis, protegidos com filme plástico. Antes e após a saturação, as amostras foram pesadas e, em seguida, colocadas na mesa de tensão para determinação das frações de micro, meso e macroporosidade, seguindo o procedimento descrito por Teixeira *et al.* (2017).

A porosidade total (Pt) foi obtida pelo método direto, a partir de amostras indeformadas previamente saturadas com água. O valor foi calculado pela diferença entre a massa do solo saturado e a do solo seco em estufa, conforme a metodologia de Teixeira *et al.* (2017).

4.4.6 Resistência à penetração de solo

O equipamento utilizado foi um penetrômetro eletrônico modelo MA-933 (Figura 15), da marca Marconi, que oferece elevada precisão e controle das condições de ensaio. O equipamento foi configurado para operar a uma velocidade constante de 0,1667 mm s⁻¹, condição necessária para assegurar a padronização das medições e a comparabilidade dos resultados entre as diferentes amostras de uso do solo.

Figura 15. Utilização do penetrômetro eletrônico



Fonte: Autor (2025)

A resistência do solo à penetração (RSP) foi determinada em amostras indeformadas coletadas com anéis volumétricos na camada de 0–20 cm, em dez pontos equidistantes. As análises foram realizadas por meio de um penetrômetro eletrônico de bancada, equipado com haste e ponteira de 4 mm de diâmetro, inserida até o centro de cada amostra, operando a uma velocidade constante de $0,0667 \text{ mm s}^{-1}$. Os demais procedimentos seguiram a metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017).

Durante os ensaios, uma célula de carga de 200 N registrou a força necessária para promover a penetração da haste no solo. Os dados obtidos foram registrados automaticamente por meio de um software específico acoplado a um microcomputador, o que garantiu maior precisão nas medições, além de agilidade e segurança no armazenamento das informações.

4.4.7 Teste de infiltração

Utilizou-se um infiltrômetro (Figura 16) de anéis concêntricos, composto por dois anéis simples, sendo o externo com diâmetro de 50 cm e o interno de 25 cm, ambos com altura de 30 cm. Esse instrumento é amplamente empregado em estudos de infiltração devido à sua facilidade de transporte, instalação e operação em campo.

Figura 16. Infiltrômetro sendo utilizado no ambiente com plantação de açaí.



Fonte: Autor (2025)

O procedimento consistiu no registro do tempo necessário para que volumes constantes de água, variando entre 30 e 100 mL, fossem infiltrados no solo, com adições realizadas em intervalos regulares de 3 a 5 minutos. Essa abordagem permitiu acompanhar a dinâmica da infiltração ao longo do tempo, possibilitando identificar o momento em que o solo atinge a condição de infiltração estável.

Para a estimativa da taxa de infiltração, utilizou-se a equação de Kostiakov-Lewis ajustada ao método Beerkan, uma relação empírica amplamente utilizada para descrever a correlação entre a taxa de infiltração e o tempo em solos. Essa equação foi originalmente proposta por Kostiakov em 1932 e posteriormente modificada por Lewis em 1954. A forma

modificada da equação de Kostiakov-Lewis é expressa conforme apresentado a seguir:

$$h = K * T^a + (VIB * T)$$

Em que:

VIB = Velocidade de infiltração básica (em cm/min);

T = tempo de infiltração (em min);

h = variação da lâmina (no intervalo de tempo T) (em cm);

a e K = constantes a serem encontradas.

4.4.8 Curva de retenção de água e condutividade hidráulica.

Foram realizadas coletas de solo com amostras indeformadas em 120 pontos distribuídos nas quatro áreas de estudo, nas profundidades de 0–20, 20–40 e 40–60 cm. Para as análises laboratoriais, foram selecionadas três amostras de cada profundidade em cada área, totalizando 12 amostras representativas das três camadas de solo nos diferentes usos da terra: açaí, macaxeira, pastagem e floresta.

As amostras indeformadas foram obtidas utilizando anéis volumétricos do tipo Uhland, com volume médio de 98,17 cm³. Todos os anéis foram previamente medidos, determinando-se a altura e os diâmetros superior e inferior, com três repetições por medida, a fim de garantir maior precisão na determinação do volume.

Após a coleta em campo, as amostras foram envolvidas em filme plástico e encaminhadas ao Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Campina Grande (Campus Areia). No laboratório, as amostras foram preparadas para os ensaios, fixando-se na base de cada anel um tecido (toalete) com auxílio de um elástico, com o objetivo de evitar a perda de material durante as análises.

Em seguida, realizou-se a saturação por capilaridade, posicionando os anéis em bandejas contendo água até atingir aproximadamente dois terços de sua altura. As amostras permaneceram nesse estado por cerca de 48 horas, garantindo a completa saturação do solo.

Após o processo de saturação, as amostras foram pesadas e submetidas à extração de água em diferentes potenciais matriciais (Ψ_m): -1, -3, -6, -10, -30, -50 e -75 kPa, utilizando uma mesa automatizada de extração de água a vácuo (EchoTech, DE). As umidades correspondentes aos potenciais de -1000 e -1500 kPa foram determinadas com o determinador do ponto de orvalho, modelo WP4-C (Decagon, EUA).

A relação entre o teor de água no solo (θ) e o potencial matricial (h) foi descrita por

meio do modelo proposto por van Genuchten (1980), ajustado à restrição de Mualem, conhecido como modelo van Genuchten-Mualem. Adicionalmente, a condutividade hidráulica (K) foi estimada com base nos modelos de van Genuchten (1980) e Brooks e Corey (1964), amplamente utilizados na caracterização físico-hídrica dos solos.

Esses modelos permitem representar de forma contínua o comportamento da retenção e da condução de água no solo, possibilitando a análise comparativa das propriedades físico-hídricas entre os diferentes sistemas de uso da terra avaliados neste estudo.

O modelo de van Genuchten descreve a curva de retenção de água no solo pela seguinte equação:

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

em que:

- θ é a umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);
- θ_r e θ_s são, respectivamente, as umidades volumétricas residual e de saturação ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);
- h é o potencial matricial (kPa);
- α é o parâmetro de escala relacionado à porosidade de entrada de ar (cm^{-1});
- n e $m = 1 - \frac{1}{n}$ são parâmetros empíricos de forma que controlam a curvatura da função.

A condutividade hidráulica não saturada, por sua vez, foi estimada com base no modelo van Genuchten–Mualem, expresso como:

$$k(\theta) = k_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2$$

onde:

- k_s é a condutividade hidráulica saturada (mm h^{-1});
- $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ representa o grau de saturação efetiva;
- m é o mesmo parâmetro de forma definido na equação anterior.

Esses modelos apresentam cinco parâmetros principais: θ_s , θ_r , α , n e K_s . Os parâmetros α e n estão fortemente relacionados à textura e à estrutura do solo, enquanto θ_s , θ_r e K_s são influenciados por características físicas, como a porosidade total e a densidade do solo.

A determinação dos parâmetros de forma e de normalização foi realizada por meio do programa BEST (*Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments*), desenvolvido por Lassabatère *et al.* (2006), que utiliza dados de infiltração obtidos em campo segundo o método Beerkan. Essa abordagem permite ajustar simultaneamente a curva de retenção de água e a curva de condutividade hidráulica do solo, fornecendo uma descrição consistente do comportamento hidrodinâmico nos diferentes sistemas de uso da terra analisados (açaí, macaxeira, pastagem e floresta).

5. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As determinações dos atributos físicos do solo, foram todas analisados por meio de estatística univariada e multivariada, utilizando o software Statistica 7 (Statsoft, 2004).

Na análise univariada, aplicou-se estatística descritiva para o cálculo da média, mediana, coeficiente de variação (CV), coeficiente de assimetria e curtose. Foram elaborados gráficos do tipo boxplot para representar as estatísticas descritivas e a distribuição inicial dos dados. As médias das variáveis, dentro de cada ambiente estudado, foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. A verificação da normalidade dos dados em cada ambiente foi realizada pelo teste de Shapiro-Wilk (SW).

6. RESULTADOS

6.1 Análise descritiva

Na camada de 40–60 cm, apresentada na Tabela 2, os agregados >2 mm exibiram ampla variação entre os sistemas de uso do solo. No cultivo de açaí, os valores variaram entre 15,52% e 53,89%, com média de 37,48% e coeficiente de variação (CV) de 35,38%, indicando variabilidade moderada. No cultivo de macaxeira, o CV foi semelhante (34,38%), porém com valores máximos mais elevados, atingindo 82,59%. Na pastagem, o CV de 49,88% caracterizou alta dispersão dos dados, enquanto a floresta apresentou o maior grau de heterogeneidade, com CV de 62,30% e amplitude variando de 3,42% a 43,52%.

Para os agregados na classe de 1–2 mm, o sistema de açaí apresentou CV de 39,72%, enquanto a macaxeira registrou o maior valor (49,99%), evidenciando maior variabilidade estrutural nesse sistema. A pastagem (35,08%) e a floresta (22,76%) apresentaram menor variabilidade relativa. Já os agregados <1 mm apresentaram CV de 27,50% no açaí, 47,38% na macaxeira, 22,34% na pastagem e 29,95% na floresta.

O Diâmetro Médio Geométrico (DMG) variou de forma moderada a elevada entre os sistemas, com CV de 34,07% no açaí, 48,96% na macaxeira, 35,75% na pastagem e 33,38% na floresta. O Diâmetro Médio Ponderado (DMP) apresentou tendência semelhante, com maior variação observada na macaxeira (39,04%), seguida pelos sistemas de açaí (37,53%), pastagem (33,38%) e floresta (31,82%). A assimetria na distribuição dos agregados, bem como nos índices DMG e DMP, variou entre valores negativos e positivos, indicando distribuições tanto à direita quanto à esquerda. Destacam-se as assimetrias positivas observadas na pastagem (0,98 e 1,08) e na macaxeira (0,52 e 0,38).

A análise da textura do solo também evidenciou diferenças entre os sistemas de uso. O teor de areia foi mais elevado no cultivo de açaí (420,9 g kg⁻¹; CV = 4,42%) e menor na floresta (213,05 g kg⁻¹; CV = 41,87%). A macaxeira apresentou CV de 6,56%, enquanto a pastagem registrou 9,45%. Os valores de silte variaram entre 353,3 g kg⁻¹ no açaí e 572,42 g kg⁻¹ na floresta, com coeficientes de variação entre 8,18% e 14,44%. Para a fração argila, observou-se maior homogeneidade no açaí (CV = 6,04%) e na pastagem (7,70%), enquanto na floresta a variabilidade foi mais elevada (18,89%).

A Resistência do Solo à Penetração (RSP) evidenciou contrastes entre os sistemas avaliados. Os valores variaram de 1,24 MPa no açaí (CV = 24,06%) a uma amplitude de 0,32 a 1,86 MPa na macaxeira (CV = 49,54%), indicando alta variabilidade e possível maior heterogeneidade estrutural nesse sistema. A pastagem apresentou o maior valor médio de

resistência (1,40 MPa), acompanhado de elevado CV (42,90%). Na floresta, o coeficiente de variação foi de 32,87%, caracterizando variabilidade moderada.

Os valores de assimetria oscilaram entre distribuições negativas e positivas para os diferentes atributos analisados. O teor de areia no açaí apresentou assimetria negativa (-0,68), enquanto na macaxeira foi positiva (0,70). Para a fração silte, a floresta registrou assimetria negativa (-0,41), enquanto a pastagem apresentou valores mais acentuados (-1,04). A argila apresentou assimetria moderada, variando de -0,40 no açaí a 0,19 na floresta. As curtoses oscilaram entre valores negativos e positivos, com tendência a curvas mais achatadas (platocúrticas), especialmente nos sistemas florestais.

Tabela 2. Análises descritivas e teste de normalidade dos atributos físicas do solo sob manejo de Açaí, Macaxeira, pastagem e floresta.

Parâmetros		Máximo	Mínimo	Média	Mediana	CV% ¹	Assimetria	Curtose	SW
Profundidade 40 - 60 cm									
Açaí									
>2 mm	%	53,89	15,52	37,48	39,16	35,38	-0,36	-1,14	0,89
1-2 mm	%	28,81	8,21	15,69	14,59	39,72	0,97	0,86	0,94
<1mm	%	70,63	33,77	46,83	43,19	27,50	0,89	-0,38	0,89
DMG	mm	0,95	0,32	0,65	0,69	34,07	-0,16	-1,31	0,93
DMP	mm	1,71	0,50	1,13	1,16	37,53	-0,10	-1,44	0,92
Areia	g kg ⁻¹	447,0	382,5	420,9	421,5	4,42	-0,68	0,88	0,84
Silte	g kg ⁻¹	405,4	304,2	353,3	355,7	8,18	-0,09	0,45	0,93
Argila	g kg ⁻¹	240,9	199,1	222,1	225,9	6,04	-0,40	-0,78	0,89
RSP	MPa	1,61	0,81	1,24	1,26	24,06	-0,21	-1,38	0,90
Macaxeira									
>2 mm	%	82,59	28,18	53,83	48,15	34,38	0,26	-1,38	0,89
1-2 mm	%	27,12	3,84	14,05	14,27	49,99	0,44	-0,20	0,94
<1mm	%	57,47	13,57	32,12	29,79	47,38	0,47	-1,19	0,87
DMG	mm	1,99	0,41	1,06	0,94	48,96	0,52	-0,72	0,94
DMP	mm	2,63	0,82	1,63	1,40	39,04	0,38	-1,35	0,89
Areia	g kg ⁻¹	358,00	301,00	323,50	318,25	6,56	0,70	-1,05	0,87
Silte	g kg ⁻¹	474,20	361,50	427,16	433,10	8,02	-0,53	-0,12	0,92
Argila	g kg ⁻¹	280,50	210,80	249,34	243,90	8,83	0,03	-0,39	0,93

RSP	MPa	1,86	0,32	0,94	0,99	49,54	0,36	0,47	0,93
Pastagem									
>2 mm	%	36,63	8,43	19,75	18,85	49,88	0,89	-0,16	0,91
1-2 mm	%	24,50	8,62	17,07	17,66	35,08	-0,24	-1,57	0,97
<1mm	%	82,18	39,92	63,18	64,03	22,34	-0,37	-0,63	0,92
DMG	mm	0,68	0,24	0,40	0,36	35,75	0,98	0,42	0,93
DMP	mm	0,68	0,25	0,40	0,36	33,38	1,08	0,73	0,94
Areia	g kg ⁻¹	326,00	247,00	278,42	275,00	9,45	0,56	-0,69	0,88
Silte	g kg ⁻¹	543,10	404,40	491,00	493,80	8,73	-1,04	0,71	0,93
Argila	g kg ⁻¹	231,00	183,30	212,28	219,17	7,70	-0,64	-1,00	0,94
RSP	MPa	2,04	0,34	1,40	1,59	42,90	-0,92	-0,36	0,97
Floresta									
>2 mm	%	43,52	3,42	22,06	21,06	62,30	0,46	-0,84	0,90
1-2 mm	%	20,69	9,13	16,06	16,69	22,76	-0,54	-0,17	0,94
<1mm	%	83,82	25,33	60,51	64,03	29,95	-0,80	0,07	0,91
DMG	mm	0,68	0,25	0,40	0,36	33,38	1,08	0,73	0,94
DMP	mm	0,85	0,27	0,60	0,58	31,82	-0,19	-1,02	0,91
Areia	g kg ⁻¹	334,00	110,50	213,05	163,00	41,87	0,44	-1,98	0,87
Silte	g kg ⁻¹	662,20	436,70	572,42	591,00	14,44	-0,41	-1,51	0,93
Argila	g kg ⁻¹	286,50	147,20	214,53	208,60	18,89	0,19	-0,11	0,92
RSP	MPa	1,40	0,52	0,90	0,85	32,87	0,43	-0,94	0,95

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

A análise estatística dos atributos físico-hídricos do solo revelou diferenças significativas entre os sistemas avaliados, conforme apresentado na Tabela 3. No cultivo de açaí, os coeficientes de variação (CV%) foram extremamente baixos para todos os atributos, variando de 1,38% (Mip) a 2,29% (Pt), o que evidencia elevada homogeneidade dos dados. Apenas o atributo Resistência do Solo à Penetração (RSP) apresentou maior variação, com CV de 27,30%, ainda assim inferior ao observado nos demais usos do solo.

Os valores de assimetria foram predominantemente negativos para Ds, Uv, Ug e Map, indicando leve concentração de valores acima da média, enquanto Pt e Mip apresentaram assimetria positiva. As curtoses oscilaram próximas de zero, variando entre -1,31 e 0,31, sugerindo distribuições próximas da normalidade (mesocúrticas). A normalidade dos dados

foi confirmada pelos elevados valores do teste de Shapiro–Wilk (SW), que variaram entre 0,86 e 0,97.

No sistema de cultivo de macaxeira, observou-se maior variabilidade nos atributos, reflexo da perturbação do solo associada às práticas agrícolas. Os coeficientes de variação foram substancialmente superiores aos observados no açaí, especialmente para Uv (15,23%), Mep (43,24%), Mip (22,59%) e RSP (39,13%), evidenciando elevada heterogeneidade estrutural. A assimetria apresentou valores negativos para Ds, Uv, Ug e Pt, enquanto Mep e Mip exibiram assimetria positiva, indicando tendência à ocorrência de valores mais elevados nesses atributos. A curtose variou de -1,44 (Mip) a 0,84 (Ds), revelando distribuições que variam de platicúrticas a levemente leptocúrticas. Os valores do teste SW (0,82–0,96) mantiveram-se em níveis aceitáveis para interpretação estatística.

No sistema de pastagem, a variabilidade apresentou comportamento intermediário. Os coeficientes de variação foram baixos para Ds (6,34%) e Ug (6,38%), moderados para Uv (12,08%) e Pt (7,77%), porém extremamente elevados para atributos relacionados à porosidade funcional. A microporosidade (Mip) apresentou CV de 61,58%, o maior entre todos os sistemas analisados, enquanto a macroporosidade (Mep) alcançou 22,59%. A assimetria manteve valores próximos de zero para a maioria dos parâmetros, exceto para Mip, que apresentou assimetria positiva elevada (1,12), caracterizando uma distribuição com cauda mais alongada. As curtoses foram predominantemente negativas, com destaque para Pt (-1,31) e Mep (-1,44), indicando distribuições mais achatadas. Os valores do teste SW oscilaram entre 0,80 e 0,97, confirmando a adequação da distribuição estatística.

No ambiente de floresta, a variabilidade natural do solo resultou em coeficientes de variação baixos a moderados para Ds (10,6%), Uv (9,4%), Ug (10,1%) e Pt (7,4%). Entretanto, atributos estruturais como Mep (30,9%) e Mip (45,9%) apresentaram elevada variabilidade, comportamento esperado em ambientes não manejados, onde a atividade biológica e a heterogeneidade estrutural são mais intensas. A assimetria foi predominantemente negativa para Ds, Ug e Pt, e positiva para Mep e Mip. As curtoses apresentaram valores negativos para a maioria dos atributos, com destaque para Map (-2,2) e Mip (-1,5), indicando distribuições platicúrticas. A normalidade dos dados mostrou-se satisfatória, com valores do teste SW variando entre 0,85 e 0,94.

De forma comparativa, o sistema de açaí apresentou o comportamento mais homogêneo, com os menores coeficientes de variação entre todos os atributos avaliados. Em seguida, destaca-se o sistema de pastagem, que, embora apresente relativa estabilidade

estrutural, demonstrou elevada dispersão na microporosidade. O cultivo de macaxeira registrou as maiores variações, especialmente em macroporosidade (Mep) e resistência do solo à penetração (RSP), evidenciando os efeitos do preparo e manejo do solo. Por sua vez, o ambiente de floresta, apesar de apresentar variabilidade natural, manteve consistência estrutural intermediária, com destaque para a elevada variabilidade em atributos funcionais, como a microporosidade.

Tabela 3. Análises descritivas e teste de normalidade dos atributos físico-hídricos do solo em diferentes ambientes na camada de 0-20 m.

Açaí								
Parâmetros	Ds	Uv	Ug	Pt	Map	Mep	Mip	RSP
CV%	1,43	1,62	1,64	2,29	1,64	1,72	1,38	27,30
Assimetria	-1,05	-1,32	-0,81	0,61	-0,81	-0,04	0,64	-0,31
Curtose	-0,37	0,31	-1,31	0,05	-1,31	-0,60	-0,26	-1,09
SW	0,88	0,86	0,87	0,93	0,87	0,97	0,94	0,9
Macaxeira								
	Ds	Uv	Ug	Pt	Map	Mep	Mip	RSP
CV%	13,60	15,23	12,54	7,61	12,54	43,24	22,59	39,13
Assimetria	-1,21	-0,57	-0,03	-0,30	-0,03	0,32	0,42	0,34
Curtose	0,84	-0,46	0,27	-1,42	0,27	-0,42	-1,44	-0,61
SW	0,89	0,82	0,85	0,94	0,87	0,96	0,91	0,92
Pastagem								
	Ds	Uv	Ug	Pt	Map	Mep	Mip	RSP
CV%	6,34	12,08	6,38	7,77	6,38	22,59	61,58	17,04
Assimetria	0,10	0,28	0,05	-0,12	0,05	0,42	1,12	-0,29
Curtose	0,11	0,17	-0,44	-1,31	-0,44	-1,44	-0,01	-0,78
SW	0,89	0,86	0,80	0,94	0,80	0,95	0,90	0,97
Floresta								
	Ds	Uv	Ug	Pt	Map	Mep	Mip	RSP
CV%	10,6	9,4	10,1	7,4	11,3	30,9	45,9	35,9
Assimetria	-0,5	0,4	-1,2	-0,6	-0,4	0,4	0,4	-0,3
Curtose	-0,3	-0,6	0,5	-0,7	-2,2	-0,4	-1,5	-0,4
SW	0,88	0,85	0,87	0,94	0,87	0,93	0,92	0,94

Fonte: Elaborado pelo Autor (2025).

6.2 Efeitos dos manejos no uso do solo

Na Figura 17 são apresentados os resultados de densidade do solo (DS), umidade volumétrica (Uv), resistência do solo à penetração (RSP) e umidade gravimétrica (Ug) nos diferentes sistemas de uso da terra, considerando as distintas camadas do perfil.

Na Figura 6A, referente à densidade do solo (DS), observa-se aumento com a profundidade em todos os sistemas avaliados, com valores variando entre 1,25 e 1,45 g cm⁻³. Os maiores valores foram registrados nos sistemas de açaí e macaxeira, especialmente entre 20–60 cm, indicando maior grau de compactação nessas áreas. Na camada superficial (0–20 cm), os valores foram semelhantes entre os usos (1,25–1,35 g cm⁻³), sem diferenças significativas. Entretanto, na camada de 40–60 cm, a pastagem apresentou valor reduzido de DS (0,55 g cm⁻³), diferindo significativamente ($p < 0,05$) dos demais sistemas, que apresentaram valores próximos de 1,4 g cm⁻³. De modo geral, a floresta apresentou menores incrementos de DS em profundidade. O aumento da densidade em áreas cultivadas está associado à compactação do solo, resultando na redução da porosidade.

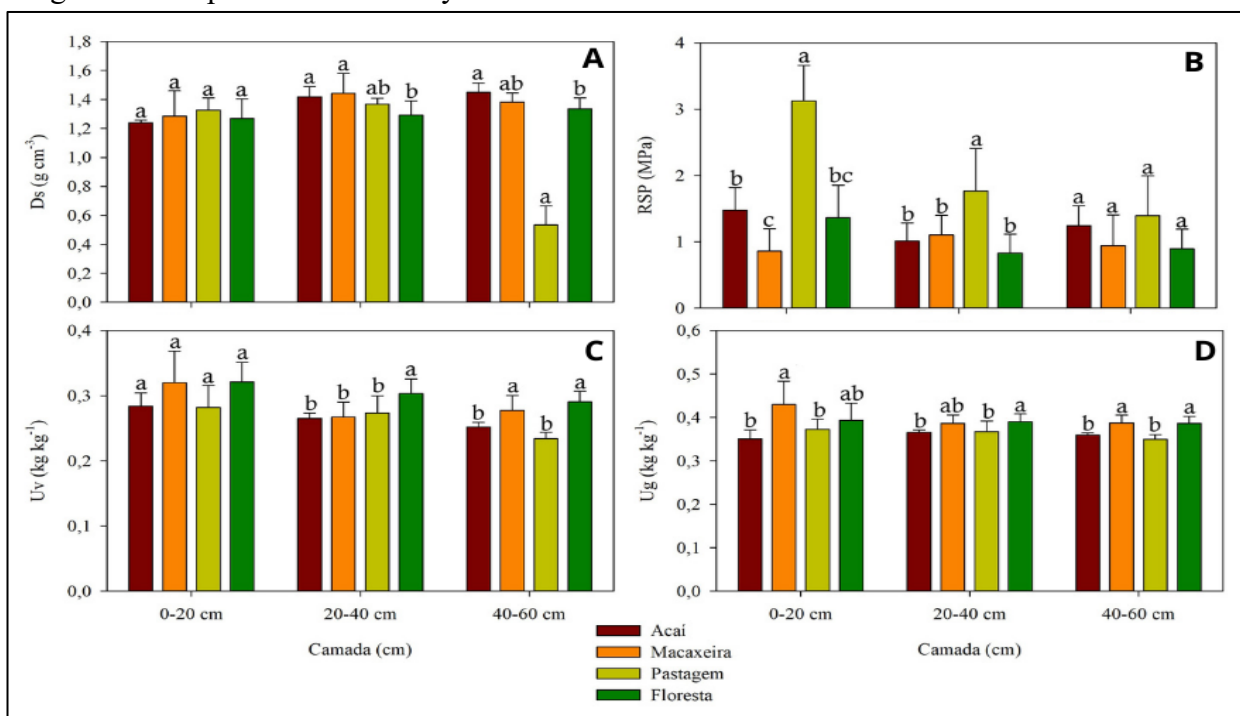
Essa tendência foi corroborada pelos resultados de resistência do solo à penetração (RSP), apresentados na Figura 6B, evidenciando elevada sensibilidade ao uso do solo. A pastagem apresentou valores críticos de compactação (>3,0 MPa na camada de 0–20 cm), significativamente superiores ($p < 0,05$) aos demais sistemas, indicando limitação ao crescimento radicular. A floresta apresentou os menores valores médios de RSP (<1,5 MPa em todas as camadas), mantendo-se dentro de limites adequados ao desenvolvimento radicular. Os sistemas de açaí e macaxeira apresentaram valores intermediários (≈1,0–1,5 MPa), sem diferenças significativas ao longo do perfil.

A umidade volumétrica (Uv), apresentada na Figura 6C, exibiu comportamento semelhante entre os sistemas. Na camada de 0–20 cm, os maiores valores foram observados na macaxeira (0,33 kg kg⁻¹) e na floresta (0,32 kg kg⁻¹), diferindo estatisticamente da pastagem (0,29 kg kg⁻¹) e do açaí (0,30 kg kg⁻¹). Na profundidade de 20–40 cm, a floresta destacou-se com os maiores valores (0,30 kg kg⁻¹), enquanto o açaí (0,27 kg kg⁻¹) e a macaxeira (0,28 kg kg⁻¹) apresentaram menores teores. Na camada de 40–60 cm, a floresta (0,29 kg kg⁻¹) manteve-se superior, seguida pela macaxeira (0,28 kg kg⁻¹), em contraste com a pastagem (0,25 kg kg⁻¹) e o açaí (0,26 kg kg⁻¹). O coeficiente de variação (CV%) variou entre 12% e 18%, sendo considerado adequado para esse tipo de análise.

A umidade gravimétrica (Ug), apresentada na Figura 6D, também variou entre os sistemas de uso e as profundidades analisadas. Na camada superficial (0–20 cm), os maiores

valores foram observados na macaxeira ($0,46 \text{ kg kg}^{-1}$) e na floresta ($0,42 \text{ kg kg}^{-1}$), diferindo estatisticamente ($p < 0,05$) do açaí ($0,36 \text{ kg kg}^{-1}$) e da pastagem ($0,38 \text{ kg kg}^{-1}$). Na camada de 20–40 cm, a floresta ($0,40 \text{ kg kg}^{-1}$) e a macaxeira ($0,39 \text{ kg kg}^{-1}$) mantiveram valores superiores em relação ao açaí ($0,36 \text{ kg kg}^{-1}$), enquanto a pastagem apresentou valor intermediário ($0,38 \text{ kg kg}^{-1}$). Na camada de 40–60 cm, a floresta ($0,39 \text{ kg kg}^{-1}$) e a macaxeira ($0,38 \text{ kg kg}^{-1}$) continuaram apresentando os maiores valores, contrastando com a pastagem ($0,34 \text{ kg kg}^{-1}$) e o açaí ($0,35 \text{ kg kg}^{-1}$). O coeficiente de variação médio para Ug foi considerado baixo a moderado, variando entre 10% e 15%.

Figura 17. Boxplot e teste de média, Avaliação da Densidade do solo (A), Resistência à penetração (B), Umidade volumétrica (C) e Umidade gravimétrica (D), entre os sistemas de uso do solo. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indica diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.



Fonte: Autor (2025)

6.3 Efeitos dos Manejos na agregação do solo

A distribuição dos agregados do solo variou em função do uso e manejo, bem como entre as diferentes camadas avaliadas, conforme apresentado na Figura 18. Para os agregados $<1 \text{ mm}$, observou-se incremento com a profundidade em todos os sistemas, com valores médios variando entre 30% e 38%. Na camada superficial (0–20 cm), a floresta apresentou maiores proporções dessa fração, enquanto a pastagem apresentou os menores valores.

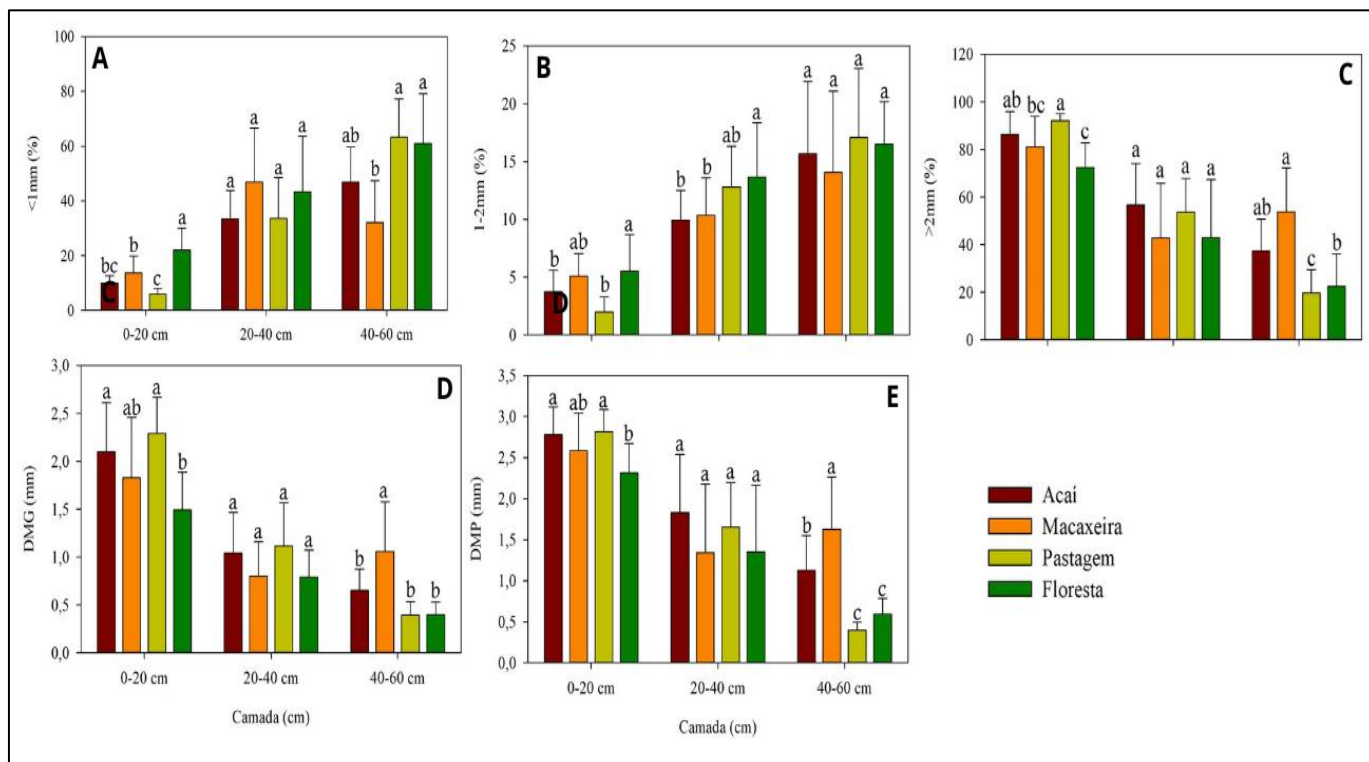
Na classe de agregados de 1–2 mm, os valores foram reduzidos na superfície, com aumento gradual em profundidade, atingindo médias entre 9% e 12% nos diferentes usos do

solo. Já os agregados >2 mm predominaram na camada superficial, com destaque para a pastagem (95%) e o açaí (88%), enquanto a floresta apresentou menor proporção (70%). Em profundidade, verificou-se redução expressiva dessa fração em todos os sistemas, sendo a macaxeira o sistema que manteve os maiores valores médios (65%).

O Diâmetro Médio Geométrico (DMG) foi mais elevado na camada superficial, destacando-se os sistemas de açaí e pastagem, com valores próximos de 2,0 mm, enquanto a floresta apresentou os menores valores (1,1 mm). Na camada mais profunda (40–60 cm), todos os sistemas apresentaram redução do DMG, com valores inferiores a 1,0 mm.

De forma semelhante, o Diâmetro Médio Ponderado (DMP) apresentou maiores valores na superfície, especialmente nos sistemas de açaí e pastagem (2,8 mm), seguido pela macaxeira (2,6 mm) e pela floresta (2,3 mm). Nas camadas mais profundas, observou-se redução em todos os sistemas, com destaque para os menores valores na floresta e na pastagem (<1,0 mm).

Figura 18. Boxplot e teste de média dos agregados do solo em diferentes ambientes, (A) 1mm, (B) 1-2mm, (C) > 2mm, (D) DMG, (E) DMP, Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indica diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.



Fonte: Autor (2025)

6.4 Impactos dos manejos na textura do solo

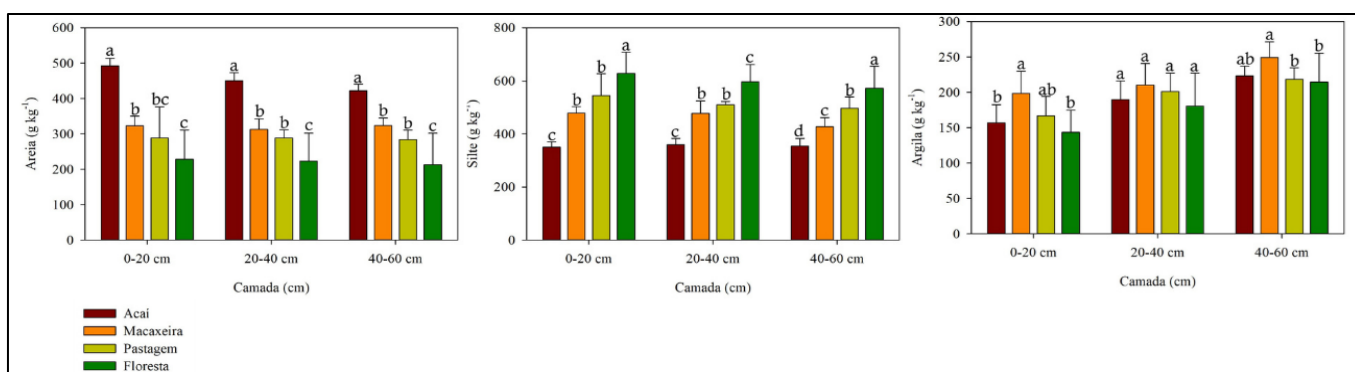
A Figura 19 apresenta os teores das frações granulométricas (areia, argila e silte), os quais variaram conforme os diferentes usos e manejos do solo (açaí, macaxeira, pastagem e floresta) e entre as profundidades analisadas (0–20, 20–40 e 40–60 cm).

Para a fração areia, os maiores valores foram observados no cultivo de açaí, variando de 490 g kg⁻¹ na camada de 0–20 cm a 420 g kg⁻¹ na de 40–60 cm. Em contraste, os menores teores ocorreram em áreas de floresta, com valores entre 210 e 220 g kg⁻¹ nas mesmas profundidades. Os sistemas de macaxeira e pastagem apresentaram valores intermediários, situando-se entre 290 e 330 g kg⁻¹.

Os teores de argila foram mais elevados nas áreas de macaxeira, atingindo aproximadamente 250 g kg⁻¹ (25%) na camada de 40–60 cm. O menor valor foi verificado no cultivo de açaí, na camada superficial (0–20 cm), com cerca de 160 g kg⁻¹ (16%). As áreas de pastagem e floresta apresentaram valores intermediários, variando entre 140 e 220 g kg⁻¹.

Em relação ao silte, os maiores teores foram observados sob floresta, com valores de 630 g kg⁻¹ (63%) na camada de 0–20 cm e 570 g kg⁻¹ (57%) na de 40–60 cm. O menor conteúdo foi registrado em solos sob açaí, variando entre 340 e 360 g kg⁻¹ (34–36%). Os sistemas de macaxeira e pastagem apresentaram valores intermediários, situando-se entre 430 e 550 g kg⁻¹.

Figura 19. Boxplot e teste de média da textura do solo em diferentes tipos de manejo, Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indica diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.



Fonte: Autor (2025)

6.5 Efeito dos cultivos na Porosidade do solo

Na Figura 20, são apresentados os resultados da análise granulométrica, evidenciando diferenças significativas entre os usos e manejos do solo. O teor de areia apresentou valores mais elevados nos sistemas de cultivo de açaí (499 g kg⁻¹ na camada de 0–20 cm; 453 g kg⁻¹ em 20–40 cm; e 423 g kg⁻¹ em 40–60 cm), distinguindo-se estatisticamente dos demais manejos. Os menores valores foram verificados em áreas de floresta (230 g kg⁻¹; 220 g kg⁻¹; e 210 g kg⁻¹, respectivamente), o que representa uma redução superior a 50% em relação ao açaí, indicando maior estabilidade textural e menor suscetibilidade à erosão.

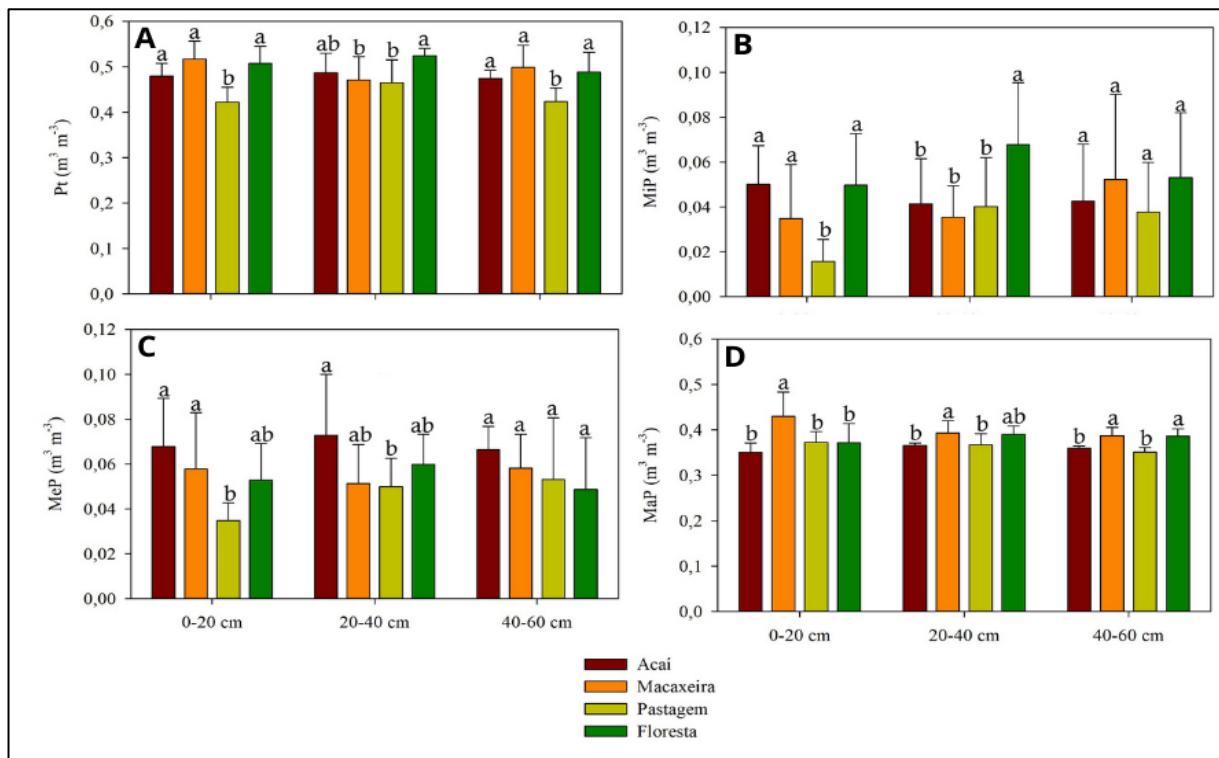
Para a fração argila, os maiores teores foram observados no sistema de macaxeira (217 g kg⁻¹ na camada de 20–40 cm e 247 g kg⁻¹ em 40–60 cm), enquanto o cultivo de açaí apresentou os menores valores, variando de 156 g kg⁻¹ (0–20 cm) a 190 g kg⁻¹ (20–40 cm). Esses resultados sugerem que a presença de culturas anuais, como a macaxeira, pode favorecer a exposição de horizontes subsuperficiais mais argilosos, diferenciando-se dos sistemas perenes.

Em relação ao silte, verificou-se predominância nas áreas de floresta (650 g kg⁻¹ na camada de 0–20 cm; 600 g kg⁻¹ em 20–40 cm; e 580 g kg⁻¹ em 40–60 cm), seguida pela pastagem (550 g kg⁻¹; 520 g kg⁻¹; e 500 g kg⁻¹, respectivamente). Os menores valores ocorreram no cultivo de açaí (350 g kg⁻¹; 360 g kg⁻¹; e 350 g kg⁻¹), evidenciando menor proporção da fração mais fina nesses sistemas.

No que se refere às classes de agregados, o diâmetro médio ponderado (DMP) foi superior nas áreas de floresta e pastagem, variando entre 3,2 e 3,8 mm, enquanto nos cultivos de açaí e macaxeira os valores foram menores (2,1 a 2,5 mm), indicando maior fragilidade estrutural do solo sob uso agrícola mais intensivo. O diâmetro médio geométrico (DMG) apresentou tendência semelhante, reforçando a predominância de macroagregados mais estáveis em ambientes florestais.

Os microagregados apresentaram maior proporção em áreas agrícolas, especialmente no cultivo de macaxeira (acima de 55%), em contraste com a floresta, que manteve valores inferiores a 40%, indicando maior preservação da estrutura em sistemas menos impactados. A porosidade total (Pt) também foi significativamente maior na floresta (superior a 60%), enquanto os sistemas de açaí e macaxeira apresentaram valores próximos de 45%, refletindo a influência do manejo sobre a qualidade física do solo.

Figura 20. Boxplot e teste de média da porosidade do solo em diferentes manejos, Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indica diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.



Fonte: Autor (2025)

6.6 Infiltração de água no solo

A avaliação da infiltração de água no solo evidenciou comportamentos distintos entre as quatro áreas analisadas (Figura 21), refletindo a influência conjunta da textura e da porosidade sobre a dinâmica hídrica.

Na área de pastagem (A), a taxa de infiltração inicial foi de aproximadamente $0,031 \text{ cm h}^{-1}$, com rápida redução nos primeiros minutos, estabilizando-se em torno de $0,004 \text{ cm h}^{-1}$ ao final de 60 minutos. A lâmina infiltrada ajustada apresentou incremento gradual, atingindo cerca de $0,396 \text{ cm}$. Esse baixo desempenho está associado à menor porosidade total (42–43%) entre os usos do solo, refletindo a compactação superficial causada pelo pisoteio animal, além da textura mais argilosa, que restringe a formação de macroporos.

Na área cultivada com macaxeira (B), observou-se a maior taxa de infiltração inicial entre os tratamentos (aproximadamente $0,042 \text{ cm h}^{-1}$), que diminuiu progressivamente até cerca de $0,007 \text{ cm h}^{-1}$ ao final do ensaio. A lâmina infiltrada foi a mais elevada, atingindo $0,776 \text{ cm}$. Esses resultados estão em consonância com a porosidade total mais elevada (49–

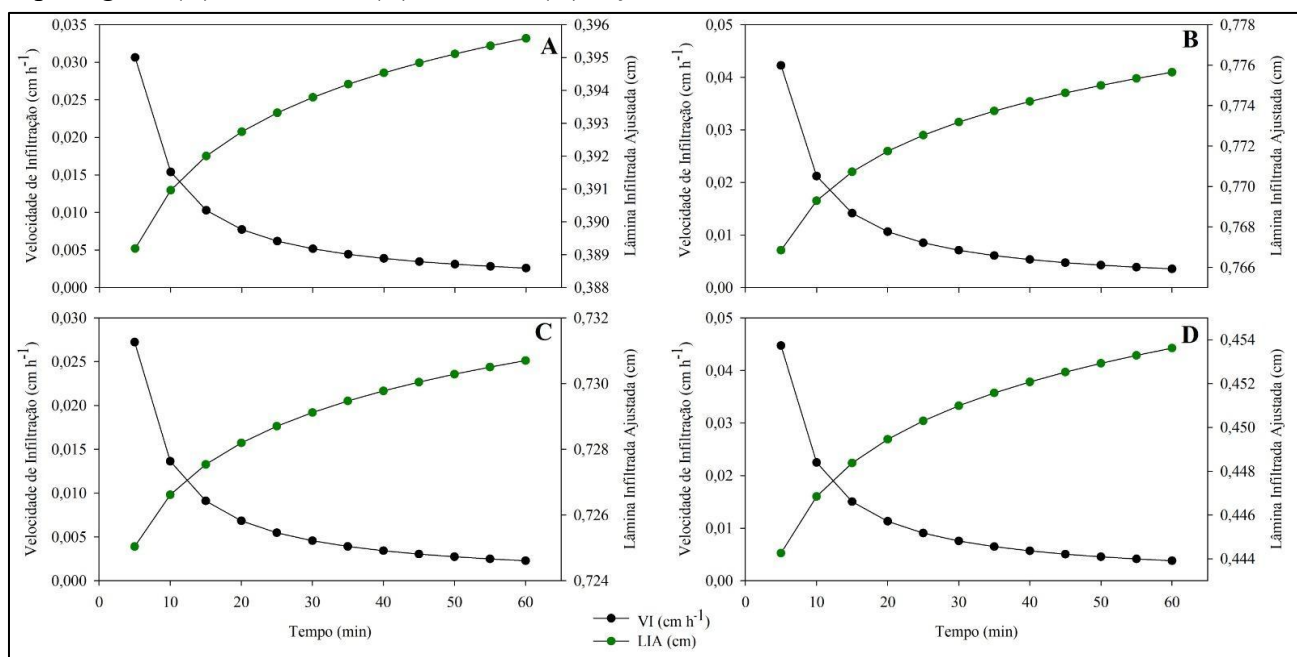
52%), evidenciando maior volume de poros ativos. Além disso, a textura relativamente mais arenosa contribui para maior condutividade hidráulica e maior capacidade de infiltração.

Na área de floresta (C), a taxa de infiltração inicial foi de 0,027 cm h⁻¹, com redução acentuada nos primeiros 10 minutos e estabilização em torno de 0,003 cm h⁻¹ aos 60 minutos. A lâmina infiltrada ajustada alcançou 0,732 cm, valor próximo ao observado na macaxeira, confirmando a elevada capacidade de infiltração em solos sob cobertura florestal. A porosidade total (50–52%) reforça esse comportamento, sendo favorecida pela presença de serrapilheira, pela ação das raízes na formação de bioporos e pela maior estabilidade estrutural do solo, que contribuem para a proteção contra a compactação superficial.

Por fim, no cultivo de açaí (D), a taxa de infiltração inicial foi de aproximadamente 0,043 cm h⁻¹, semelhante à observada na macaxeira, porém com decréscimo mais acentuado ao longo do tempo, atingindo cerca de 0,005 cm h⁻¹ ao final do ensaio. A lâmina infiltrada ajustada acumulada foi intermediária em relação aos demais sistemas, alcançando 0,454 cm. A porosidade total variou entre 47% e 49%, indicando comportamento também intermediário, superior ao da pastagem, mas inferior ao da macaxeira e da floresta.

De modo geral, a associação entre textura e porosidade total explica os padrões de infiltração observados nos diferentes usos da terra. Destacam-se os sistemas de floresta e macaxeira como mais favoráveis à entrada e retenção de água, enquanto a pastagem apresenta limitações hidráulicas significativas, principalmente em decorrência da compactação do solo.

Figura 21. Teste de infiltração de água no solo sob quatro áreas de cultivos, (A) pastagem, (B) macaxeira, (C) floresta e (D) Açaí.



Fonte: Autor (2025)

6.7 Curva de retenção de água e condutividade hidráulica

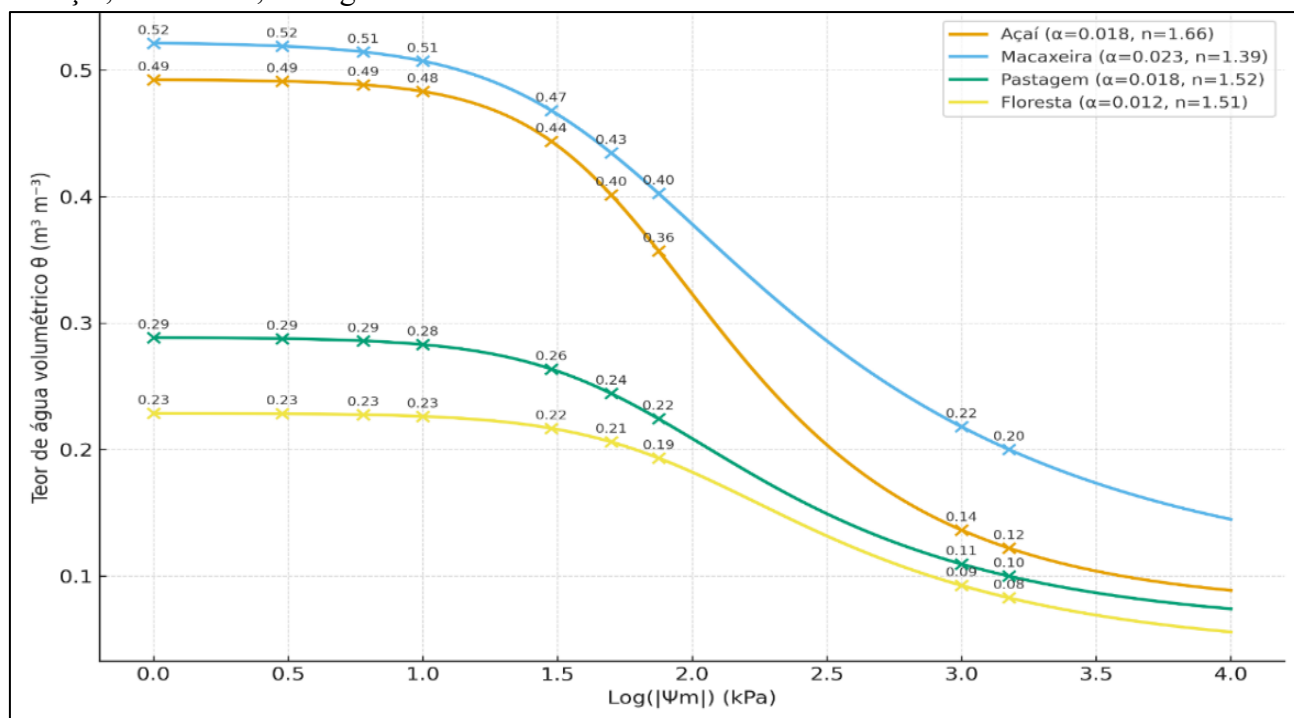
As curvas ajustadas de retenção de água e de condutividade hidráulica, obtidas por meio do modelo de van Genuchten–Mualem, permitiram avaliar o comportamento hídrico dos solos sob diferentes usos (açaí, macaxeira, pastagem e floresta), conforme apresentado na Figura 11, com base nos parâmetros empíricos α , n e K_s .

Para a curva de retenção de água, observou-se que o teor de água volumétrica (θ) decresce com o aumento do potencial matricial ($|\Psi_m|$), comportamento típico de solos não saturados. Os valores de α , que representam a inversa da pressão de entrada de ar e, portanto, a facilidade de drenagem do solo, variaram de $0,012 \text{ kPa}^{-1}$ (floresta) a $0,023 \text{ kPa}^{-1}$ (macaxeira). Esse intervalo indica que o solo sob floresta apresenta maior resistência à perda de água, mantendo a umidade mesmo sob maiores tensões, enquanto o solo cultivado com macaxeira libera água mais rapidamente, sugerindo predominância de macroporos e menor coesão estrutural.

O parâmetro n , associado à distribuição do tamanho de poros, variou entre 1,39 e 1,66, indicando solos com estrutura porosa relativamente heterogênea, característica comum em sistemas tropicais de textura média a argilosa. O maior valor de n (1,66) foi observado no cultivo de açaí, refletindo uma distribuição mais equilibrada entre micro e macroporos e, conseqüentemente, uma transição mais gradual da saturação para condições de maior sucção. Em contrapartida, o menor valor ($n = 1,39$) foi registrado na macaxeira, reforçando a tendência de rápida perda de água, coerente com o manejo agrícola e maior exposição do solo.

Comparando os teores de água volumétrica (θ) entre os diferentes usos, o solo sob floresta apresentou os maiores valores médios, variando de $0,23$ a $0,51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, evidenciando elevada capacidade de retenção e maior estabilidade hídrica. O solo sob açaí apresentou valores semelhantes ($0,23$ a $0,49 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), indicando um comportamento intermediário entre o ambiente natural e o sistema cultivado, o que sugere relativa conservação da estrutura física. A pastagem, por sua vez, apresentou valores mais baixos ($0,21$ a $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), refletindo redução da água disponível, possivelmente associada à compactação superficial decorrente do pisoteio animal. Já o solo sob macaxeira apresentou comportamento típico de rápida drenagem, com θ variando entre $0,12$ e $0,52 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, indicando menor retenção de água em tensões mais elevadas e, conseqüentemente, menor disponibilidade hídrica para as plantas.

Figura 22. Curva Ajustadas de retenção de água no solo sob quatro áreas de cultivos; Açaí, Macaxeira, Pastagem e Floresta.



Fonte: Autor (2025)

As curvas de condutividade hidráulica (K), apresentadas na Figura 23 e ajustadas pelo modelo de van Genuchten–Mualem, evidenciaram que a condutividade diminui de forma exponencial com o aumento do potencial matricial, em conformidade com o comportamento esperado para solos não saturados. A condutividade hidráulica saturada (K_s) apresentou ampla variação entre os usos do solo, refletindo diferenças estruturais e texturais significativas.

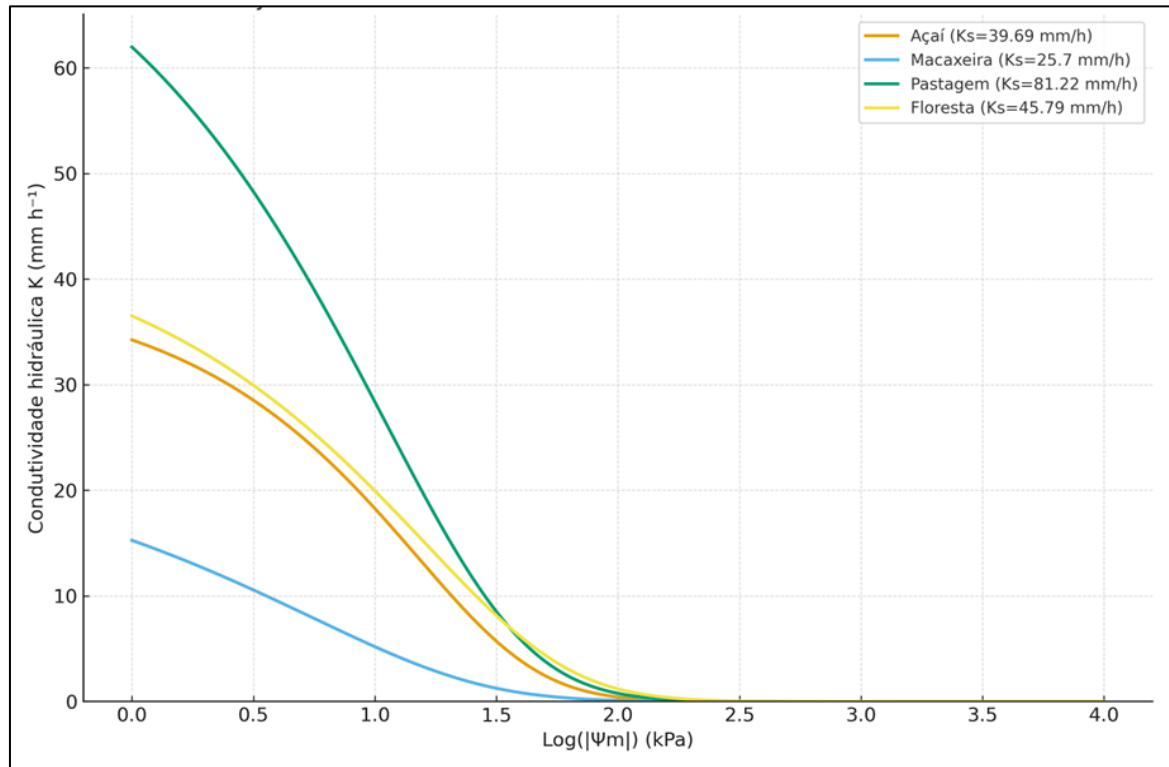
O maior valor de K_s foi observado na pastagem ($81,22 \text{ mm h}^{-1}$), indicando elevada permeabilidade e possível predominância de macroporos contínuos. No entanto, esse resultado deve ser interpretado com cautela, uma vez que, conforme evidenciado anteriormente, a pastagem também apresenta sinais de compactação superficial, o que pode limitar a infiltração efetiva ao longo do tempo e reduzir a capacidade de armazenamento hídrico.

O solo sob floresta apresentou K_s intermediário ($45,79 \text{ mm h}^{-1}$), refletindo um equilíbrio entre infiltração e retenção de água, associado a uma estrutura estável e boa conectividade dos poros, favorecida pela presença de matéria orgânica e atividade biológica.

No cultivo de açaí, o valor de K_s ($39,69 \text{ mm h}^{-1}$) foi próximo ao observado na floresta, indicando relativa manutenção das propriedades hidráulicas do solo e sugerindo menor impacto do manejo sobre a estrutura. Por outro lado, o solo sob macaxeira apresentou o menor valor de K_s ($25,70 \text{ mm h}^{-1}$), o que pode ser atribuído à redução da condutividade hidráulica

em decorrência da compactação e da menor continuidade de poros estruturais, associadas ao preparo intensivo do solo e ao tráfego de máquinas.

Figura 23. Curva ajustadas de condutividade Hidráulica, van Genuchten - Mualem, sob diferente sistema de cultivos.



Fonte: Autor (2025)

As curvas analisadas indicam que o uso e o manejo do solo influenciam diretamente o comportamento hidráulico. Os sistemas com cobertura vegetal, como floresta e açaí, apresentaram maior equilíbrio entre retenção de água e condutividade hidráulica, contribuindo para a manutenção da funcionalidade hídrica do solo. Em contrapartida, os sistemas de uso mais intensivo, como macaxeira e pastagem, evidenciaram sinais de degradação estrutural, com redução da porosidade efetiva e alterações na dinâmica da água no solo.

Nesse contexto, os resultados obtidos demonstram que o modelo de van Genuchten–Mualem ajustou-se adequadamente aos dados experimentais, permitindo discriminar de forma consistente as diferenças no comportamento físico-hídrico dos solos sob distintos usos.

Dessa forma, os resultados reforçam a importância da manutenção da cobertura vegetal e da adoção de práticas conservacionistas como estratégias fundamentais para a preservação das propriedades hidráulicas do solo, bem como para a sustentação de sua capacidade produtiva ao longo do tempo.

7. DISCUSSÕES

7.1 Efeitos dos manejos sob os atributos físicos do solo

Os valores observados evidenciam que os atributos físicos do solo foram significativamente influenciados pelos diferentes sistemas de uso da terra. A densidade do solo (DS) apresentou aumento com a profundidade em todos os usos avaliados, variando de 1,25 a 1,45 g cm⁻³, com destaque para os cultivos de açaí e macaxeira, que registraram os maiores valores na camada de 20–60 cm.

O aumento da densidade do solo nas áreas cultivadas indica maior grau de compactação, resultante, em grande parte, do tráfego de máquinas, do pisoteio animal e de práticas de manejo inadequadas. Esse processo reduz a macroporosidade, comprometendo a difusão de gases, a aeração e a infiltração de água, fatores essenciais para o equilíbrio físico e biológico do solo (Kiehl, 1979; Reichert *et al.*, 2007; Bonelli, 2011; Fernandes, 2022). Tais resultados corroboram estudos que apontam a expansão agrícola e o uso intensivo do solo como fatores determinantes na degradação estrutural e no aumento da densidade em áreas previamente florestadas (Reichert *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2023).

Em contrapartida, a floresta apresentou menores incrementos de DS em profundidade, evidenciando a importância da cobertura vegetal nativa na manutenção da estrutura e da qualidade física do solo (Carvalho *et al.*, 2010).

A resistência à penetração (RSP) reforçou essa tendência, mostrando-se altamente sensível ao manejo. Valores críticos foram observados na pastagem (>3,0 MPa na camada de 0–20 cm), considerados limitantes ao desenvolvimento radicular, conforme Tormena *et al.* (1998), que indicam limites entre 2,0 e 3,0 MPa para restrição do crescimento das raízes. A floresta manteve valores inferiores a 1,5 MPa em todas as profundidades, indicando condições mais favoráveis à penetração radicular, enquanto os cultivos de açaí e macaxeira apresentaram valores intermediários (~1,0–1,5 MPa). Esse resultado evidencia a influência do tráfego de máquinas e do pisoteio animal no aumento da resistência mecânica do solo, em consonância com Silva *et al.* (2024).

A umidade volumétrica (Uv) apresentou maior retenção na camada superficial sob macaxeira (0,33 kg kg⁻¹) e floresta (≈0,32 kg kg⁻¹), diferindo da pastagem e do açaí. Em profundidade, a floresta manteve os maiores valores, evidenciando maior capacidade de retenção de água, associada ao maior aporte de matéria orgânica e à preservação da estrutura do solo (Six *et al.*, 2002). Por outro lado, a pastagem apresentou os menores valores na camada de 40–60 cm (≈0,25 kg kg⁻¹), indicando degradação estrutural e possível redução da

disponibilidade hídrica.

A umidade gravimétrica (U_g) apresentou padrão semelhante. Na camada superficial (0–20 cm), macaxeira e floresta se destacaram com valores de 0,46 e 0,42 kg kg^{-1} , respectivamente, superiores aos observados em pastagem e açaí. Esse comportamento se manteve nas demais profundidades, confirmando a maior estabilidade física e hídrica da floresta em comparação aos sistemas cultivados. De acordo com Brady e Weil (2013), solos sob cobertura nativa apresentam maior teor de matéria orgânica, favorecendo a retenção de água e o equilíbrio entre macro e microporosidade.

De forma geral, os dados indicam que a conversão da floresta em áreas de cultivo (macaxeira e açaí) e, principalmente, em pastagem, resulta em degradação gradual dos atributos físicos do solo, evidenciada pelo aumento da compactação (DS e RSP) e pela redução da retenção hídrica (U_v e U_g). Esse processo compromete diretamente a funcionalidade do sistema edáfico, afetando o desenvolvimento das plantas e a dinâmica da água no solo (Reichert, Suzuki & Reinert, 2007; Oliveira *et al.*, 2023).

A análise integrada da distribuição dos agregados revelou variações em função do uso e manejo, indicando que a conversão da floresta em sistemas agrícolas e pastagens interfere diretamente na estabilidade estrutural do solo. A fração <1 mm aumentou com a profundidade em todos os sistemas, com maiores proporções na floresta e menores na pastagem, padrão associado à maior presença de matéria orgânica e atividade biológica nos ambientes florestais, fatores essenciais para a formação e estabilização de microagregados (Six *et al.*, 2000; Bronick & Lal, 2005).

Na fração de 1–2 mm, observou-se incremento em profundidade, com médias entre 9% e 12% nos diferentes manejos. Já os agregados >2 mm predominaram na camada superficial, especialmente na pastagem (95%) e no açaí (88%). Esse resultado sugere que a pressão exercida pelo manejo e pelo pisoteio animal favorece a formação de macroagregados superficiais menos estáveis, os quais tendem a se desagregar em profundidade (Silva & Mielniczuk, 1997; Salton *et al.*, 2008). A menor proporção dessa fração na floresta (70%) reforça a influência da ciclagem natural de resíduos e da atividade radicular na manutenção do equilíbrio estrutural.

Os valores de Diâmetro Médio Geométrico (DMG) e Diâmetro Médio Ponderado (DMP) confirmam essa tendência. Valores mais elevados na superfície em açaí e pastagem (DMG $\approx 2,0$ mm; DMP $\approx 2,8$ mm) indicam maior predominância de macroagregados, enquanto a floresta apresentou menores valores (DMG $\approx 1,1$ mm; DMP $\approx 2,3$ mm). Em

profundidade (40–60 cm), todos os sistemas apresentaram redução expressiva ($<1,0$ mm), indicando menor estabilidade estrutural. Segundo Tisdall & Oades (1982), a estabilidade dos agregados está diretamente relacionada à interação entre matéria orgânica e frações minerais, especialmente argila, interação que tende a diminuir com a profundidade.

Assim, os resultados demonstram que os sistemas agrícolas (macaxeira e açaí) e a pastagem alteram a distribuição e a estabilidade dos agregados do solo. Enquanto a floresta mantém uma estrutura mais equilibrada e estável, os sistemas cultivados favorecem a formação de macroagregados menos resistentes, especialmente em profundidade. Essa redução na estabilidade estrutural está associada ao manejo intensivo e à menor incorporação de matéria orgânica, conforme destacado por Salton *et al.* (2005) e Six *et al.* (2000).

7.2 Efeitos dos diferentes manejos do solo nas propriedades hidráulicas

A infiltração de água no solo apresentou comportamento variável entre os diferentes sistemas de cultivo analisados, refletindo a influência conjunta da textura, da porosidade e da estrutura do solo. Observou-se que a pastagem apresentou o desempenho mais restritivo, com taxa inicial de infiltração de aproximadamente $0,031\text{ cm h}^{-1}$, reduzindo-se rapidamente e estabilizando-se em torno de $0,004\text{ cm h}^{-1}$, resultando em uma lâmina acumulada de apenas $0,396\text{ cm}$. Esse comportamento é típico de solos com compactação superficial e baixa porosidade total (42–43%), decorrentes do pisoteio animal e do tráfego intenso.

Resultados semelhantes foram reportados por Furquim *et al.* (2020) e Andrade *et al.* (2020), que identificaram menores taxas de infiltração em áreas de pastagem degradada, associadas ao aumento da densidade do solo e à redução de macroporos. Bernardo *et al.* (2019) também destacam que o uso contínuo do solo para pastagem tende a reduzir a condutividade hidráulica, dificultando a percolação da água e favorecendo o escoamento superficial.

Em contraste, a área cultivada com macaxeira apresentou a maior taxa de infiltração inicial ($0,042\text{ cm h}^{-1}$) e a maior lâmina acumulada ($0,776\text{ cm}$), associadas à porosidade total entre 49% e 52%. Esses resultados indicam maior volume de poros ativos e melhor conectividade estrutural, favorecendo a percolação da água. A textura relativamente mais arenosa também contribui para a maior condutividade hidráulica. Resultados semelhantes foram descritos por Alves *et al.* (2024), que observaram maior infiltração em sistemas agrícolas bem manejados no ecótono Cerrado–Amazônia, destacando o papel do manejo adequado da cobertura e do controle do revolvimento superficial na manutenção da conectividade dos poros.

A área de floresta apresentou taxa inicial de infiltração de $0,027 \text{ cm h}^{-1}$, estabilizando-se em $0,003 \text{ cm h}^{-1}$ e alcançando lâmina acumulada de $0,732 \text{ cm}$, valor próximo ao observado na macaxeira. Mesmo com menor taxa inicial, manteve elevada capacidade de infiltração, favorecida pela presença de bioporos formados por raízes e organismos do solo, que aumentam a condutividade hidráulica e reduzem o impacto das chuvas. De acordo com Silva e Trece (2023), solos sob cobertura florestal apresentam maiores taxas de infiltração devido à proteção superficial e à maior estabilidade estrutural. Brito *et al.* (2023) reforçam que a cobertura vegetal densa contribui para a manutenção da infiltração ao longo do tempo.

No cultivo de açaí, a taxa inicial de infiltração ($0,043 \text{ cm h}^{-1}$) foi semelhante à da macaxeira, porém apresentou redução mais acentuada ao longo do tempo, estabilizando-se em $0,005 \text{ cm h}^{-1}$, com lâmina acumulada intermediária ($0,454 \text{ cm}$). A porosidade entre 47% e 49% indica um solo ainda funcional, embora parcialmente alterado. Alves *et al.* (2023) relatam comportamento semelhante, destacando que cultivos perenes mantêm boa estrutura e capacidade de infiltração quando manejados adequadamente.

De forma geral, os resultados evidenciam um gradiente de infiltração diretamente relacionado à qualidade estrutural do solo e à intensidade de uso: pastagem < açaí < floresta < macaxeira. Esse padrão está em concordância com diversos estudos (Furquim *et al.*, 2020; Silva & Trece, 2023; Alves *et al.*, 2024), que associam a infiltração à preservação dos poros estruturais e à menor compactação superficial. Em termos hidrológicos, sistemas com maior cobertura vegetal e menor perturbação mecânica favorecem a infiltração e reduzem o escoamento superficial, contribuindo para maior armazenamento de água no solo e menor suscetibilidade à erosão.

Além disso, a relação entre porosidade total e taxa de infiltração observada neste estudo está de acordo com a literatura, que destaca a importância da distribuição de macro e microporos na condutividade hidráulica (Alves *et al.*, 2024; Brito *et al.*, 2023). A compactação superficial reduz a conectividade dos macroporos e a continuidade vertical, prejudicando o fluxo de água e a recarga hídrica. Por outro lado, sistemas que mantêm cobertura vegetal e elevada bioturbação, como a floresta, favorecem maior infiltração, estabilidade estrutural e resiliência hídrica.

A análise das curvas de retenção de água indicou comportamentos distintos entre os sistemas, especialmente nas menores tensões (1 a 10 hPa). As áreas cultivadas com açaí e macaxeira apresentaram maiores valores de teor volumétrico de água (θ), próximos a $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, indicando maior presença de macroporos e bioporos na camada superficial. Essa condição

favorece tanto a infiltração quanto o armazenamento de água, corroborando Silva *et al.* (2022), que destacam a influência do manejo na distribuição dos poros.

Em tensões intermediárias e elevadas (100–1500 hPa), as curvas tornaram-se mais semelhantes entre os sistemas, com pequenas variações associadas à heterogeneidade textural e às condições estruturais do solo. Essa variabilidade está relacionada à dinâmica espacial e temporal da umidade, conforme evidenciado por Aparecido (2020) e EMBRAPA (2022).

Os parâmetros do modelo de van Genuchten indicaram que o parâmetro α foi o mais sensível às mudanças estruturais. Valores mais elevados nas áreas agrícolas (0,018–0,023) indicam maior facilidade de drenagem, enquanto valores menores na floresta (0,012) refletem maior retenção de água e estabilidade estrutural. Esses resultados corroboram Silva *et al.* (2022) e Freitas *et al.* (2021), evidenciando que o manejo influencia diretamente a forma das curvas de retenção.

As curvas de condutividade hidráulica (K), ajustadas pelo modelo de van Genuchten–Mualem, apresentaram comportamento exponencial decrescente com o aumento do potencial matricial, típico de solos não saturados (van Genuchten & Mualem, 1980). A condutividade hidráulica saturada (Ks) variou entre os sistemas, evidenciando diferenças estruturais relevantes.

O maior valor de Ks foi observado na pastagem (81,22 mm h⁻¹), indicando a presença de macroporos contínuos e fluxo preferencial. No entanto, esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois pode refletir a presença de canais preferenciais em solos compactados, sem necessariamente indicar melhor qualidade estrutural. Estudos como Silva *et al.* (2022) e Moratelli *et al.* (2023) relatam comportamento semelhante em pastagens degradadas.

O solo sob floresta apresentou Ks intermediário (45,79 mm h⁻¹), compatível com sua estrutura estável e boa conectividade dos poros. No cultivo de açaí, o valor de Ks (39,69 mm h⁻¹) próximo ao da floresta indica manutenção parcial das propriedades hidráulicas. Por outro lado, o solo sob macaxeira apresentou o menor valor (25,70 mm h⁻¹), refletindo a redução da condutividade associada ao preparo intensivo e à compactação.

De forma geral, os resultados demonstram que o uso e o manejo do solo influenciam diretamente o comportamento hidráulico, sendo o modelo de van Genuchten–Mualem adequado para representar essas variações. Sistemas com cobertura florestal e cultivos perenes apresentaram maior equilíbrio entre retenção e condutividade, enquanto sistemas intensivos evidenciaram degradação estrutural.

Assim, a manutenção da cobertura vegetal, o controle do revolvimento do solo e a

adoção de práticas conservacionistas são fundamentais para preservar a funcionalidade hidrofísica do solo e garantir sua sustentabilidade produtiva ao longo do tempo.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa permitiram compreender, de forma integrada, como diferentes formas de uso e manejo da terra influenciam as propriedades físicas e hidráulicas do solo no sul do Amazonas. Em continuidade às análises apresentadas, a comparação entre áreas de floresta, pastagem, açcaizal e cultivo de macaxeira evidenciou que o aumento da intervenção antrópica, especialmente quando associado à ausência de práticas conservacionistas, tende a provocar alterações significativas na estrutura do solo e em sua capacidade de infiltração e armazenamento de água.

Entre os ambientes analisados, a floresta apresentou as melhores condições estruturais, com maior estabilidade de agregados, elevada porosidade e menor resistência à penetração. Essas características favorecem a infiltração de água e contribuem para a manutenção do equilíbrio hidrofísico do solo. Em contrapartida, as áreas de pastagem e cultivo de macaxeira apresentaram sinais mais evidentes de compactação e redução da macroporosidade, fatores que podem limitar o desenvolvimento radicular e intensificar o escoamento superficial.

Essas alterações estruturais não afetam apenas a organização física do solo, mas também o funcionamento dos sistemas produtivos. A compactação, associada à menor infiltração, dificulta o crescimento das raízes e reduz a disponibilidade de água e nutrientes, comprometendo o desempenho das culturas. Simultaneamente, o aumento do escoamento superficial pode intensificar processos erosivos e favorecer a perda de matéria orgânica e nutrientes, agravando a degradação do solo ao longo do tempo.

Nesse contexto, as áreas de floresta assumem um papel fundamental como referência de qualidade do solo, evidenciando a importância da conservação dos remanescentes florestais na região. Além de seu valor ecológico intrínseco, esses ambientes permitem compreender o funcionamento natural dos solos amazônicos e servem como base comparativa para a definição de estratégias de recuperação em áreas degradadas.

Adicionalmente, os resultados reforçam a necessidade de adoção de práticas de manejo que favoreçam a conservação do solo, tais como a manutenção da cobertura vegetal, a redução do revolvimento, a incorporação de matéria orgânica e o manejo adequado das pastagens. Tais medidas contribuem para a melhoria da estrutura do solo, aumentando a infiltração de água e mitigando os efeitos da compactação.

Por fim, é importante considerar que este estudo foi conduzido em condições edafoclimáticas e de uso específicas, o que impõe limitações à generalização dos resultados. Dessa forma, pesquisas futuras podem ampliar essa abordagem, incorporando análises

químicas e biológicas do solo, bem como monitoramentos de longo prazo que permitam avaliar a dinâmica das mudanças decorrentes do uso da terra. Com isso, será possível aprofundar o entendimento sobre a qualidade dos solos amazônicos e subsidiar a adoção de práticas de manejo mais sustentáveis.

Diante de todo o exposto, esta pesquisa evidencia, de forma robusta e fundamentada, que a intensificação do uso da terra, quando dissociada de práticas conservacionistas, compromete significativamente as propriedades físicas e hidráulicas dos solos no sul do Amazonas. A degradação observada nas áreas de pastagem e cultivo de macaxeira confirma a vulnerabilidade estrutural do solo frente ao manejo inadequado, refletida na compactação, na redução da porosidade e na limitação da infiltração de água. Em contraposição, os ambientes sob floresta nativa e cultivo perene de açaí demonstraram maior estabilidade estrutural e melhor desempenho físico-hídrico, reafirmando o papel da cobertura vegetal contínua como elemento central para a manutenção da qualidade edáfica.

Nesse sentido, a hipótese inicialmente proposta foi validada, uma vez que as mudanças no uso da terra impactaram diretamente o comportamento físico-hídrico dos solos analisados. A floresta nativa consolida-se como referência ecológica e funcional, não apenas por sua relevância ambiental intrínseca, mas também por representar um parâmetro técnico para estratégias de restauração e manejo sustentável.

Ademais, os achados reforçam a necessidade de uma transição paradigmática no modelo de ocupação e exploração do solo na Amazônia, substituindo práticas intensivas e degradantes por abordagens fundamentadas na conservação, na diversificação produtiva e na integração entre produção e preservação ambiental. Nessa perspectiva, o solo deve ser reconhecido como um recurso estratégico, finito e vulnerável, cuja integridade constitui condição essencial para a segurança alimentar, a resiliência dos agroecossistemas e a manutenção dos serviços ecossistêmicos.

Destaca-se, ainda, que a consolidação de sistemas produtivos sustentáveis na região demanda não apenas avanços técnicos, mas também o fortalecimento de políticas públicas e de ações de extensão rural que promovam a capacitação dos produtores e a difusão de práticas conservacionistas. Assim, a proteção e o manejo adequado do solo configuram-se como imperativos científicos, éticos e socioambientais, fundamentais para assegurar o equilíbrio ecológico e o desenvolvimento sustentável das presentes e futuras gerações na Amazônia.

REFERÊNCIAS

- ABNT, 1984. **7181-Análise granulométrica. In: Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Amaro Filho, J., de Negreiros, R.F.D., de Assis Júnior, R.N., Mota, J.C.A., 2007.
- ALAGNA, V., CAVALLARO, V., D'ASARO, F., GRISTINA, L., & LA MANTIA, T. (2018). Influence of soil use and land cover on soil physical properties in a semi-arid Mediterranean area. **Geoderma Regional**, 15, e00211.
- ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., J.L., SPAROVEK, G. 2013. **Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift** 22, 711-728. Disponível: <http://dx.doi:10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em 03 fev. 2024.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVES, C. H. P.; *et al.* Effects of land use and cropping on soil erosion in tropical region. **Sustainability**, v. 15, n. 6, p. 4954, 2023. DOI: 10.3390/su15064954
- ALVES, C. H. P.; *et al.* Water infiltration in different soil covers and management in the Cerrado-Amazon ecotone, **Brazil. Soils**, v. 8, n. 1, p. 31–45, 2024. DOI: 10.3390/soils8010031
- ALVES, E. A.; SOUZA, L. M.; BARBOSA, F. M. Influência do manejo e da cobertura vegetal sobre a infiltração de água em solos do ecótono Cerrado–Amazônia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.16, n.4, p.1893–1907, 2023.
- ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M.; MENDONÇA, E. S. Efeito da compactação do solo sobre o crescimento radicular de plantas cultivadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 10, n. 1, p. 35-42, 1986.
- AJAYI, C. O.; OLUTUMISE, A. I. Determinants of food security and technical efficiency of cassava farmers in Ondo State, Nigeria. **International Food and Agribusiness Management Review**, v. 21, n. 7, p. 915–928, 18 set. 2018.
- ALMEIDA, E. L. D. *et al.* Filter paper method for the determination of the soil water retention curve. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.5, p.1344-1352, 2017.
- ANDRADE, C. L. B.; *et al.* **Capacidade de infiltração no solo em área de pastagem degradada e sistema ILP no primeiro ano.** Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 4, p. 18944–18959, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n4-158
- APARECIDO, L. E. de O. Caracterização hídrica espacial e sazonal do estado do Mato Grosso do Sul com dados em grade. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 1-18, 2020. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/74289>. Acesso em: 4 nov. 2024.
- ARATANI, R. G., FREDDI, O. D. S., CENTURION, J. F., & ANDRIOLI, I. (2009). Qualidade física de um Latossolo Vermelho acriférico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33(3), 677-687.

ARAÚJO, M. A., TORMENA, C. A., & SILVA, A. P. (2004). Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28(2), 337-345.

ARAÚJO, M. A., TORMENA, C. A., & SILVA, A. P. (2007). Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31(6), 1069-1076.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W.J.; LACERDA, M.P.C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob Cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1099-1108, 2007.

ARAÚJO, R., VIEIRA, I. C. G., TOLEDO, P. M., COELHO, A. S., DALLA-NORA, E., MILANEZ, F. 2019. **Territórios e alianças políticas do pós ambientalismo**. Estudos Avançados, 33 (95).

ARGENTON, J., ALBUQUERQUE, J. A., BAYER, C., & WILDNER, L. D. P. (2005). **Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 29(3), 425-435.

BARCELOS, A. A.; CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E. Infiltração de água em um Latossolo Vermelho-Escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 687–694, 1999.

BECKER, B. K. 2004. **Amazônia: geopolítica na virada do III milênio**. Garamond. Rio de Janeiro. 172p.

BECKER, B. K. 2010. Rede de parcerias e modelo socioambiental. In: ARAÚJO, R.; LÉNA, P.(Org.) **Desenvolvimento sustentável e sociedades na Amazônia**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi. p.57-84.

BECKER, R., GEBREMICHAEL, M., MÄRKER, M. 2018. Impact of soil surface and subsurface properties on soil saturated hydraulic conductivity in the semi-arid Walnut Gulch Experimental Watershed, **Arizona**, USA. *Geoderma* 322, 112-120. Disponível: <http://dx.doi:10.1016/j.geoderma.2018.02.02>. Acesso em 05 fev. 2024.

BEZERRA, V. S.; FREITAS-SILVA, O.; DAMASCENO, L. F. **Açaí: produção de frutos, mercado e consumo**. In: Jornada Científica da Embrapa Amapá, 2., 2016, Macapá. Resumos... Macapá: Embrapa Amapá, 2016. p. 19.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. **Geoderma No-tillage and soil physical environment**. *Geoderma*, v. 326, n. February, p. 164–200.

BOCUTI, E. D. *et al.* **Effective hydraulic conductivity and its relationship with the other attributes of Cerrado soils**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 24, n.1807–1929, p. 357–363, 2020.

BOCUTI, E., SILVA, M., SANTOS, P., & MENDONÇA, R. (2020). Impactos da urbanização na qualidade da água de rios urbanos: um estudo de caso na cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 15(4), 120-135.

BONELLI, E. A. Compactação do solo: efeitos nas características físicas — revisão / artigo (2011) que discute causas (tráfego de máquinas, pisoteio) e efeitos (redução de macroporosidade, restrição à difusão de gases). **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** 15 (3) • Mar 2011 • <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000300007>.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. The Nature and Properties of Soils. 14th ed. Upper Saddle River: **Pearson Education**, 2013. 980 p.

BRAUD, I., ANGULO-JARAMILLO, R., & GAUDET, J. P. (2005). Soil infiltration process: A review of recent advances and future challenges. In M. Th. van Genuchten, F. J. Leij, & L. Wu (Eds.), **Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils** (pp. 157–169). Riverside, CA: University of California.

BRITO, E. M., MELLO, K., COSTA, D. R., FARIA, L. C., VALENTE, R. A., 2016. **Geotecnologias aplicadas ao estudo do conflito de uso do solo visando o planejamento ambiental**. Irriga 21, 577-590.

BRITO, F. L.; *et al.* Hydrological and soil hydrophobicity dynamics in tropical forest soils. **Forest Ecosystems**, v. 10, n. 15, 2023. DOI: 10.1007/s11676-022-01501-5

BRITO, M. M.; PEREIRA, L. C.; MENDES, D. F. Efeitos da cobertura florestal na infiltração e condutividade hidráulica de solos tropicais. **Revista Árvore**, v.45, n.2, p.223–238, 2021.

Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). **Soil structure and management: a review**. **Geoderma**, 124, 3–22.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media**. Hydrology Paper, n. 3, Colorado State University, Fort Collins, 1964.

CALONEGO, J. C., & ROSOLEM, C. A. (2008). **Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotações de culturas e escarificação**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32(4), 1399-1407.

CARVALHO, C. A.; LIMA, R. S.; SILVA, J. T. Desempenho físico-hídrico de solos cultivados com açaizeiro sob diferentes manejos. **Agroecossistemas**, v.12, n.3, p.55–68, 2020.

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, p.175-86, 2010.

CARVALHO, Rosileia da Costa. **Recuperação florestal em açaiçais de várzea submetidos ao manejo intensivo no estuário amazônico**. 2018. 105 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto Amazônico de Agriculturas Familiares, Programa de Pós-graduação em Agriculturas Amazônicas, Belém, 2018. Disponível em: <<http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/10237>>. Acesso em: 13 de fev. 2024.

CASTRO FILHO, C., MUZILLI, O., & PODANOSCHI, A. L. (1998). Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22(3), 527-538.

COLLARES, G. L., REINERT, D. J., REICHERT, J. M., & KAISER, D. R. (2006). **Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 41(11), 1663-1674.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. **Compactação superficial de Latossolos sob integração lavoura: pecuária de leite no noroeste do Rio Grande do Sul**. Ci. Rural, 41:246-250, 2011.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Perspectivas para a agropecuária**. Disponível em: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Perspectivas_para_a_Agropecuaria_-_V.2_-_Safr_2014-2015.pdf, 2018.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Macaxeira**: Produção estimada brasileira de raiz de macaxeira para o ano de 2022 Conab, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-eextrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de>. Acesso em: [24 de agosto de 2025].

COSTANZA, R. *et al.* **The value of the world's ecosystem services and natural capital**. *Nature*, v. 387, p. 253-260, May 1997.

COSTA, M. A. T. *et al.* Resistência do solo à penetração e produção de raízes e de forragem em diferentes níveis de intensificação do pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 993–1004, jun. 2020.

CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. E. P.; OLIVEIRA, D. M. S.; DAVIDSON, E. A.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. C. Tropical conservation agriculture and soil carbon stocks: The role of active and passive fractions of soil organic matter. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 225, p. 52–63, 2016.

DOMINATI; MURRAY PATTERSON; ALEC MACKAY (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. **Ecological Economics**, 69(9), 1858-1868. DOI:10.1016/j.ecolecon. acessado: 24 de junho 2024.

DE SOUZA, T. A. F.; *et al.* **Amazonian deforestation and its influence on soil biotic and hydrophysical properties**. *Catena*, v.226, p.107002, 2023. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107002.

EMBRAPA. **Estudo das condições ambientais no Brasil**. Brasília: Embrapa, 1997.

EMBRAPA. Simulação de fluxos de água e solutos no solo. Brasília, DF: Embrapa, 2022. (**Boletim Técnico, n. 130**). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1149891/simulacao-de-fluxos-de-agua-e-solutos-no-solo>. Acesso em: 4 nov. 2025.

EMBRAPA SOLOS. Manual de Métodos de Análise de Solo. 3. ed., **revista e ampliada**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: [junho de 2025].

FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Data Production and trade**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/> Acessado 15 de março 2024.

FERNÁNDEZ-GÁLVEZ, J., SORIA, C., & JIMÉNEZ, J. J. (2019). Spatial variability and scale considerations in the measurement of soil hydraulic properties. **Geoderma**, 347, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.019>.

FERNANDES, B. B. Efeito do tráfego agrícola na infiltração de água no solo. Irriga (artigo), 2022. **Irriga, Edição- Centro-oeste, Botucatu**, v. 27, n. 2, p. 343-356, abril-junho, 2022.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.3, p.515-524, 1999.

FLORES, C.A. **O uso da terra e a necessidade de mudanças**. 2008. Disponível em: http://www.infobibos.com.br/artigos/2008_3/usoterra/index.htm. Acesso em: 14 de março 2024.

FOLEY, J. A., DEFRIES, R., ASNER, G. P., BAFORD, C., BONAN, G., CARPENTER, S. R., CHAPLIN, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005). **Global consequences of land use**. *Science*, 309(5734), 570-574.

FREIRE, R. R., SILVA, D. D., & LIMA, J. L. (2003). Avaliação de sistemas de manejo na qualidade física de um Latossolo Vermelho-Escuro utilizando a infiltração e a qualidade da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27(4), 715-724.

FREITAS, L. R.; GUBIANI, P. I.; MULAZZANI, R. P.; MINELLA, J. P. G.; LONDERO, A. L. Terracing increases soil available water to plants in no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 45, e0210046, 2021. DOI: 10.36783/18069657rbc20210046

FUENTES-LLANILLO, R., TORMENA, C. A., FIDALSKI, J., & MARQUES, J. (2006). **Inter-relações entre a forma da curva de retenção de água e propriedades físicas do solo**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30(6), 985-995.

FURQUIM, S. A. C.; *et al.* Taxa de infiltração e propriedades físicas do solo sob diferentes usos em Latossolo Vermelho. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento** – Embrapa Arroz e Feijão, v. 45, 2020.

GONÇALVES, A. C. A.; LIBARDI, P. L. **Propriedades hidráulicas do solo**. In: DOURADO NETO, D.; *et al.* (Eds.). Manual de irrigação. 8. ed. rev. atual. e ampl. Viçosa, MG: UFV, 2013. p. 149-186.

GONÇALVES, F. C.; MORAES, M. H. Porosidade e infiltração de água do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Irriga**, v.17, n.3, p.

HAIR, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2014). **Multivariate data analysis (7th ed.)**. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.

HARA, Y., M., SAKURAI, K., K., & MIURA, S. (2019). Effects of soil texture and structure on saturated hydraulic conductivity and soil water retention curve under various land uses in a hillslope area. **Hydrological Processes**, 33(12), 1748-1760.

HARTEMINK, A. E. **The Definition of Soil Since the Early 1800s**. Advances in Agronomy, v. 137, p. 73–126, 2016.

HAVERKAMP, R., Parlange, J.-Y., Ross, P.J., (1994). "Physically Based Description of Soil Water Hysteresis," **Soil Sci. Soc. Am. J.** 58(2), 352-359.

HENRIQUE, R. S. Perda de nutrientes por lixiviação em solos arenosos sob diferentes sistemas de cultivo. Tese (Doutorado em Agronomia) — **Universidade Federal de Lavras**, Lavras, 2019.

HE, J.; LI, H.; RASMUSSEN, C.; LAL, R. **Soil texture and organic carbon associations in the subtropical region of China**. Catena, v. 117, p. 245–252, 2014.

HICKMANN, C., COSTA, L. M. D., SCHAEFER, C. E. G. R., & FERNANDES, R. B. A. (2011). **Atributos físico-hídricos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob sistema de plantio direto e mata atlântica**. Revista Árvore, 35(5), 1109-1118.

HONKANEN, H. *et al.* Soil & Tillage Research Response of boreal clay soil **properties and erosion to ten years of no-till management**. Soil & Tillage Research, v. 212, p. 105043, 2021.

HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 14, p. 446–460, 1933.

HORTA, A., Malone, B. P., & Minasny, B. (2014). **Uncertainty in soil property predictions: methods and applications**. Geoderma, 223-225, 80-88.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027>.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção Agrícola Municipal - PAM. Disponível: <https://www.ibge.gov.br/busca.html?searchword=CACAU&searchphrase=all&I>. Acesso em: 14 de abril 2024.

JUNQUEIRA, R., VILLALOBOS, F. J., & SOUZA, C. A. (2018). **Soil hydraulic conductivity: challenges and methods for accurate determination**. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 18(4), 1025-1043.

JESUS, Thays Frazão de. Manejo, produção e qualidade de açaí de terra firme associado à densidade de touceira e adubação orgânica sob sistema agroflorestal. São Luís: Universidade Estadual do Maranhão, 2021. **Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agroecologia**, Universidade Estadual do Maranhão.

KEMPER, W. D., & CHEPIL, W. S. (1965). **Size distribution of aggregates. Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling, 9, 499-510.

KIEHL, E. J. Manual de edafologia: relação solo-planta. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p. LASSABATÈRE, L. *et al.* Beerkan Estimation of Soil Transfer (BEST) procedure for hydrological soil characterization. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 5, p. 1552-1568, 2006.

KAMBALIMATH S. & DEKA P. C. (2020). “A basic review of fuzzy logic applications in hydrology and water resources.” **Applied Water Science**, 10, 191. DOI: 10.1007/s13201-020-01276-2.

KLAUS REICHARDT & LUÍS CARLOS TIMM (2016). “The recent similarity hypotheses to describe water infiltration into homogeneous soils.” **Scientia Agricola**, 73(4), 379-383. DOI:10.1590/0103-9016-2015-0364.

KUNZ, M., GONÇALVES, A. D. M. D. A., REICHERT, J. M., GUIMARÃES, R. M. L., REINERT, D. J., & RODRIGUES, M. F. (2013). Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 37, 1699-1708.

LASSABATÈRE, L., ANGULO-JARAMILLO, R., SORIA UGALDE, J. M., CUENCA, R., BRAUD, I., & HAVERKAMP, R. **Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments—Bare soil experiments**. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 521–532. (2006).

LEPSCH, I. F.; BELLINAZZI JR., R.; BERTOLINI, D.; ESPÍNDOLA, C. R. Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso. 4ª aproximação. **Campinas: SBCE**, 1991, 175p.

LI, L., ZHANG, X., SHI, P., TIAN, Y., & LIU, S. (2017). **Effects of land-use change on soil hydraulic properties in a small catchment on the Loess Plateau of China**. *Catena*, 150, 1-9.(2017).

LI, Y., ZHANG, M., ZHANG, Y., & ZHANG, Y. Impacts of land use and land cover change on soil hydraulic properties: **A review. Journal of Hydrology**, 575, 1231-1244.(2019).

LIMA FILHO, S.A., Levantamento pedológico detalhado do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos. Araras: **Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental, UFSCAR**, 2000. 17 p. (Boletim Técnico).

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Fertilidade do solo e produtividade agrícola**. In: NOVAIS RF, ALVAREZ V, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (eds.) **Fertilidade do solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017p.

LOPES, V. S.; CARDOSO, I. M.; LOPES, A. da S. Percepção de agricultores(as) sobre práticas de conservação de solo e água implantadas com apoio de órgãos públicos. **Revista ELO – Diálogos em Extensão**, v. 10, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/elo/article/view/12166>

MAGALHÃES, F. E. A. Análise hídrica de 3 cenários: SAF Horta Floresta, Pasto e ... Trabalho/Relatório — **Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro**, 2023.

MESQUITA, M. L. R., & MORAES, J. F. L. (2004). **Hidráulica dos solos**. In: Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., Teixeira, W. G. (Eds.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica.

MINIGHIN, E. C.; ANASTÁCIO, L. R.; MELO, J. O. F.; LABANCA, R. A. Açaí (*Euterpe oleracea*) e suas contribuições para o alcance da ingestão diária aceitável de ácidos graxos essenciais. **Research, Society and Development**, [s.l.], v. 9, n. 8, p. e760986116, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i8.6116.

MYCHELLE K. T. OLIVEIRA *et al.* (2023). **Ação antrópica na erosão de solo em bacias hidrográficas do semiárido brasileiro**. **HOLOS**, 39(8), e16838. DOI:10.15628/holos.2023.16838.

MO, Y., ZHANG, Z., ZHANG, X., CAO, Y., ZOU, J., YANG, H., ... & ZHU, Y. (2017). **Sustainable management practices enhanced soil organic carbon sequestration in paddy fields of subtropical China**. **Journal of Soils and Sediments**, 17(6), 1559-1568.

MORAES, M. C. P., MELLO, K., Toppa, R.H., 2017. **Protected areas and agricultural expansion: biodiversity conservation versus economic growth in the southeast of brazil**. **Journal Of Environmental Management** 188, 73-84.

MORATELLI, F. A.; SILVA, R. C.; LOPES, M. N. **Effects of Land Use on Soil Physical-Hydric Attributes in Two Watersheds in the Southern Amazon**. **Soils**, v.8, p.35–49, 2023.

MORGAN, R. P. C. Soil erosion and conservation. 3. ed. **Oxford**: Blackwell Publishing, 2005.

NASCIMENTO, D. G.; FREITAS, J. R.; RIBEIRO, L. C. Impactos do preparo do solo sobre a condutividade hidráulica em cultivos de macaxeira. **Revista Engenharia Agrícola**, v.41, n.5, p.765–776, 2021.

NETO, M. D. C., SOUZA, E. D., MENDONÇA, E. S., & NETO, A. D. F. (2017). Hydraulic properties of a sandy loam soil under different soil management systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 21(10), 712-716.

NERY, A. R.; RODRIGUES, L. N.; SOUSA, A. G.; SANTOS, F. F. C.; NERE, D. E. R. **Infiltração da água nos solos cultivados com palma forrageira e pastagem no IFCE campus Crato. Acta Kariri — Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 2, p. 56–61, 2017.

OCAÑA-REYES, J. A.; *et al.* Tillage Systems Modify the Soil Properties and Cassava Performance. **Agronomy**, v.14, n.1, p.117–132, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14010117.

OLDEMAN, L.R. **Impact of soil degradation: a global scenario. Wageningen**, ISRIC, 2000. 12p. (Report 2000/2001).

OLIVEIRA, T. S.; LIMA, R. P.; SILVA, A. R. *et al.* Physical degradation of soils under different land uses in the Brazilian Amazon. **Catena**, v. 230, p. 107–122, 2023. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107122.

OLIVEIRA, M. S.; MENEZES, J. A.; PATRÍCIO, J.; S; FROZZI, J.; GOMES, J. M. Variabilidade Temporal do Efluxo de CO₂ em Áreas de Floresta Secundária e Campo Natural na Região Sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 3, p. 1466–1480, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>.

ONU. **Organização das Nações Unidas**. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: <https://www.tce.ms.gov.br/portal-modernizacao/assets/downloads/cartilha-ods/cartilha-ods-15-09-18.pdf>. Acesso em 18 março de 2024.

PACHEPSKY, Y.; GENUCHTEN, M. T. VAN. PEDOTRANSFER FUNCTIONS. **Encyclopedia of agrophysics**. Springer, Berlin, v. 1, p. 556–560, 2011.

PENNER, M., SPILLER, M., & LEUTHER, F. (2019). Comparison of laboratory and field methods for determining hydraulic conductivity of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 83(6), 1576-1585.

PHILLIPS, A., SILVA, R., SANTOS, L., MENDES, C. (2008). Efeitos da remoção da cobertura vegetal e compactação do solo na infiltração de água e na disponibilidade hídrica para plantas e ecossistemas. **Revista Brasileira de Ecologia**, 5(3), 78-89.

QUEZADA, J. C.; GUILLAUME, T.; POEPLAU, C.; GHAZOUL, J.; BUTTLER, A. Deforestation-free land-use change and organic matter-centered management improve the C footprint of oil palm expansion. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 28, n. 7, p. 2476–2490, 2022. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.16069>>. Acesso em: 14 abr. 2024.

RAMOS, T. B.; *et al.* Development and functional evaluation of pedotransfer functions for Mualem–van Genuchten parameters. **Soil and Tillage Research**, v.231, p.105748, 2023. DOI: 10.1016/j.still.2023.105748.

REICHERT, J. M., REINERT, D. J., & BRAIDA, J. A. (2003). Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, 27(1), 29-48. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.37, n.1, p.232-241, 2013.

REINERT, D. J.; *et al.* Limites críticos da densidade do solo para o crescimento radicular e produção, 2008. **Ciência & Ambiente**, 27(1), 29-48. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.37, n.1, p.232-241, 2013.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: **identificação, efeitos, limites críticos e mitigação**.2007.<https://www.researchgate.net/publication/283498339>.Acessado: 27 de março de 2025.

REICHERT, J. M., SUZUKI, L. E. A. D., E REINERT, D. J. (2003). Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em Ciência do Solo**, 3, 49–134.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Propriedades físicas do solo e manejo da água em diferentes texturas. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2012**,

SALTON, J. C., MIELNICZUK, J., BAYER, C., BOENI, M., CONCEIÇÃO, P. C., FABRÍCIO, A. C., & BROCH, D. L. (2008). Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32(1), 11-21.

SALTON, J.C. **Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical**, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.158p. (Tese de Doutorado)

SANTOS, C. A. G.; SILVA, J. F. C. B. C.; SILVA, R. M. **Caracterização hidrodinâmica dos solos da bacia experimental do Riacho Guaraíra utilizando o Método Beerkan**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 17, n. 4, p. 149-160, 2012.

SANTOS, J. R. DOS, MONTENEGRO, A. A. A., SOBRINHO, T. A., & ALMEIDA, J. A. DE. (2013). Processos hidrológicos e o manejo de bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 17(Suppl), S118-S126.

SANTOS, A. J. M.; VILLAS BÔAS, R. L.; BACKES, C.; de GODOY, L. J.; BARDIVIESSO, D. M. Mobilização do solo, velocidade de infiltração de água e taxa de cobertura do solo pela grama esmeralda, sob manejos mecanizados. **Energia na Agricultura, Botucatu**, v. 29, n. 3, p. 197-204, julho-set./2014.

SCHEFFLER, E., COSTA, M., SANTOS, A., & OLIVEIRA, R. (2011). **Avaliação dos impactos da agricultura intensiva na qualidade do solo e da água em áreas de cultivo de soja no Brasil**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 35(2), 245-258.

SCHALLER, F. W.; STOCKINGER, K. R. A comparison of five methods for expressing aggregation data. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 17, p. 310-313, 1953.”

SHAH, A. N., Li, Y., Wang, L., & Jiang, Y. (2017). A review on soil macropore hydraulic characteristics and their determination. **Soil and Tillage Research**, 174, 125-140.

STEFANOSKI, D. C.; FERNANDES, A. L. T.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. dos. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 10, p. 1047–1054, 2013

SILVA, A. P., BABUJIA, L. C., FRANCHINI, J. C., SOUZA, R. A., & HUNGRIA, M. (2010). Atributos físicos do solo e estoques de carbono e nitrogênio em diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas em um Latossolo do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34(4), 1333-1342.

SILVA, E.M. da.; AZEVEDO, J.A. de. **Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de Cerrado**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.37, p.1487-1494,2002.

SILVA, I. **Mapeamento de atributos físico-hídricos em solos sob diferentes usos e manejos**. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) — Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2023.

SILVA, G. H.; TRECE, J. P. Infiltração de água no solo sob diferentes condições de uso: sistema agroflorestal, pastagem e floresta. **Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 3, p. 167–175, 2023.

SILVA, G. R. D. *et al.* Life Cycle Greenhouse Gas Emissions in Maize No-Till Agroecosystems in Southern Brazil Based on a Long-Term Experiment. **Sustainability**, v.16, p.4012, 2024.

SILVA, I. F., & MIELNICZUK, J. (1997). Ação do sistema radicular das plantas na formação e estabilização dos agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 21, 113–117.

SILVA, L. G.; TRECE, A. M. Condutividade hidráulica e propriedades físicas de solos sob diferentes usos na Amazônia Legal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.46, p.e0220052, 2022.

SILVA, M. de O.; VELOSO, L.; NASCIMENTO, D. L. do; OLIVEIRA, J. de; PEREIRA, D. de F.; COSTA, D. da S. **Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo**. Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, jul. 2020.

SILVA, M. G.; ARF, O.; ALVES, M. C.; BUZETTI, S. **Sucessão de culturas e sua influência nas propriedades físicas do solo e na produtividade do feijoeiro de inverno irrigado, em diferentes sistemas de manejo do solo**. Bragantia, v.67, n.2, p.335-347, 2008.

SILVA, R. F. da; MOURA, E. G.; LISKA, G. R.; OLIVEIRA, G. C. de; FERREIRA, D. F.; DIAS JUNIOR, M. de S.; SANTOS, G. G. Modelling soil water retention to identify management influence on soil pore characteristics. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 94, n. 4, e20190944, 2022. DOI: 10.1590/0001-3765202220190944.

SIX, J. *et al.* (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, 241(2), 155–176.

SIX, J., Elliott, E. T., & Paustian, K. (2000). Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology & Biochemistry**, 32, 2099–2103.

SKAAL SVEEN, K.; INGRAM, J.; CLARKE, L. E. **The effect of no-till farming the soil functions of water purification and retention in north-western Europe**: A literature review. *Soiland Tillage Research*, v. 189, p. 98-109.

SOUZA, A. N.; MELLO, C. R.; FERREIRA, D. F.; LIMA, J. M. de. Erosão do solo na Amazônia: implicações sociais, econômicas e ambientais. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 20, n. 3, p. 123-134, 2018.

SOUZA, Luan Martins de. Compactação do solo e o impacto na variação espacial de atributos físico-hídricos e produtividade da soja. Trabalho de Conclusão de Curso (**Graduação em Agronomia**) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. URI: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/30719>.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. [s.l.] Brasília, DF: Embrapa, 2017., 2017.

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

TORMENA, C. A. *et al.* **Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS)**. In: ALVARENGA, R. C. *et al.* (Eds.). Métodos de Análise Física do Solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016. p. 122-124.

VAN GENUCHTEN, M. T.; MUALEM, Y. Predictive Models for the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892–898, 1980.

VERBURG, P. H., Neumann, K., & Nol, L. (2015). Challenges in using land use and land cover data for global change studies. **Global Change Biology**, 17(2), 974-989.

VEZZANI, F. M., & MIELNICZUK, J. (2011). Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35(1), 213-223.

VILARINHO, F. M., COELHO, E. F., RAMOS, M. M., SILVA, A. M. DA, & SILVA, D. K. A. da. (2013). Influência da compactação do solo na velocidade de infiltração básica de água em um Latossolo Vermelho. **Engenharia na Agricultura**, 21(6), 493-501.

VILLA, Bruna *et al.* Balanço hídrico climatológico: Uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, p. e50211626669-e50211626669, 2022.

WADT, P.G.S. **Práticas de conservação do solo e recuperação de áreas degradadas**. Rio Branco: Embrapa Acre, (Documentos 90), p.29. 2003.

WENDLING, B., JUCKSCH, I., MENDONÇA, E. D. S., & NEVES, J. C. L. (2005). **Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 40(5), 487-494.

ZHANG, C., SHAO, M., ZHANG, W., & ZHU, Y. (2020). **Effects of land use and slope aspect on soil hydraulic properties in a semi-arid basin on the Loess Plateau of China**. Catena, 185, 104288.

ZIEBA, D., USOWICZ, B., ŁUKOWSKI, M., & MARCZEWSKI, W. (2017). **Influence of soil compaction on water retention and hydraulic conductivity**. Soil and Tillage Research, 174, 77-84.

ZIMMERMAN, A. R.; GAO, B.; AHN, M. **Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils**. Soil Biology & Biochemistry, n. 43, p: 1169 – 1179, 2006.

ZONTA, E. Erosão hídrica em solos arenosos: avaliação de práticas conservacionistas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 400–407, 2011.