

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE EDUCAÇÃO AGRICULTURA E AMBIENTE
CAMPOS VALE DO RIO MADEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

**Avaliação dos atributos físicos da qualidade do solo em
sistema de uso no sul do Amazonas, Brasil**

FRANCILEL ARRUDA BEZERRA

Humaitá, AM
2024

FRANCILEL ARRUDA BEZERRA

Avaliação dos atributos físicos da qualidade do solo em sistema de uso no sul do Amazonas, Brasil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amazonas como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais. Linha de Pesquisa: Componentes e Dinâmicas dos Ecossistemas com Ênfase no Bioma Amazônico.

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ MAURÍCIO DA CUNHA

COORIENTADOR: DR. RENATO FRANCISCO DA SILVA SOUZA

Humaitá, AM
2024

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

B574a Bezerra, Francielel Arruda
Avaliação dos atributos físicos da qualidade do solo em sistema de uso no sul do Amazonas, Brasil / Francielel Arruda Bezerra . 2024
77 f.: 31 cm.

Orientador: Jose Mauricio Da Cunha
Coorientador: Renato Francisco da Silva Souza
Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Densidade do solo. 2. Resistência do solo à penetração. 3. agregados do solo. 4. Porosidade total do solo. I. Cunha, Jose Mauricio Da. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

FRANCILEL ARRUDA BEZERRA

Avaliação dos atributos físicos da qualidade do solo em sistema de uso no sul do Amazonas, Brasil

Dissertação defendida e aprovada em 29 de fevereiro de 2024, pela comissão julgadora:

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. José Mauricio da Cunha
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente – IEAA/UFAM

Examinadora Interna: Prof. Dr. Bruno Campos Mantovanelli
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente – IEAA/UFAM

Examinadora Externa: Prof. Dr. Luís Antônio Coutrim dos Santos
Centro de Estudos Superiores de Itacoatiara – CESIT/UEA

Aos meus familiares, e a todos
que de alguma forma
contribuíram para a realização
deste trabalho.

Dedico!

AGRADECIMENTO

A DEUS, que na sua infinita misericórdia vela por nós em todos os momentos.

Meus pais, e toda minha família pelo apoio e incentivo.

Ao meu orientador prof. Dr. José Maurício da Cunha, pelas orientações. Ao grupo de pesquisa solos e ambiente amazônico, na pessoa do prof. Dr. Douglas Marcelo pinheiro da Silva pela confiança e a todos os bolsistas e voluntários do laboratório de solos que me deram o suporte necessário para realização desse trabalho.

Ao Senhor José Carlos Tavagini por ceder a área para montar o experimento e pelas informações prestadas. Aos examinadores pela disponibilidade e contribuições na finalização do trabalho.

Aos meus amigos/Colegas Railam Xavier correia, Chayanny Lemos, Lucas Matheus de Carvalho, Guilherme Abadia, Priscila Cruz, Dayana Bitencourt, Rizoneide Souza e Miquele pelo apoio durante a coleta e análises de laboratório.

A toda a equipe que integra ou fizeram parte do Laboratório de Pedobiologia do Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente – IEAA, da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, em Humaitá, em especial Prof. Dr. Douglas Marcelo, Rafael Zárate-Salazar e Renato Francisco

A Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa durante o período do mestrado.

Aos técnicos e funcionários terceirizados que muito nos ajudaram no suporte logístico, meu muito obrigado.

É preferível cultivar o respeito
do bem que o respeito pela lei.

Henry Thoreau

LISTA DE FIGURA

Figura 1. Principais classes de solos dominantes no estado do Amazonas e seu percentual em relação à área total do estado.....	20
Figura 2. Mapa de localização aproximado da área de estudo com as áreas de pastagens, floresta, mandioca e açaí.....	35
Figura 3. Avaliação da Densidade do solo (A), Resistência à penetração (B), Porosidade total (C) entre os sistemas de uso da terra. Letras diferentes indicam diferenças significativas de acordo com o teste de Tukey ao 5% ($P < 0,05$).....	41
Figura 4. Frações granulométricas do solo argila, silte e areia.....	45
Figura 5. Matéria orgânica de solo (MOS), diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP).....	47

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Descrição de uso e histórico das áreas sob pastagem, mandioca, açaí e floresta na região sul do Amazonas	36
Tabela 2. Atributos físicos do solo sob quatro sistema de uso em diferentes profundidades na região sul do Amazonas.....	43
Tabela 3. Atributos físicos do solo sob quatro sistema de uso em diferentes profundidades na região sul do Amazonas.....	49
Tabela 4. Coeficientes de correlação de Pearson dos indicadores físicos do solo em sistemas de açaizal no sul da Amazonas.....	53
Tabela 5. Coeficientes de correlação de Pearson dos indicadores físicos do solo em Floresta Natural no sul da Amazonas.	54
Tabela 6. Coeficientes de correlação de Pearson dos indicadores físicos do solo no sistema de mandiocal no sul da Amazonas	55
Tabela 7. Coeficientes de correlação de Pearson dos indicadores físicos do solo no sistema de pastagem no sul da Amazonas.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS

- PT- Porosidade total do solo
- RSP- Resistencia solo a penetração
- DS- Densidade do solo
- PT- Porosidade total
- UV- Umidade volumétrica
- DMG- Diâmetro médio geométrico
- DMP- Diâmetro médio ponderado

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

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

SUMÁRIO

RESUMO	13
ABSTRACT	14
1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3. REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1 Classes de solos do Amazonas	19
3.2 Qualidade do solo	22
3.2.1 Qualidade física do solo	25
3.3 Sistemas de uso da terra	27
3.3.1 Floresta Natural	28
3.3.2 Cultivo de açaí	30
3.3.3 Cultivo de mandioca	31
3.3.4 Cultivo de pastagens	32
5. MATERIAL E MÉTODOS	35
5.1 Área de estudo	35
5.2 Histórico dos sistemas de uso	36
5.3 Coleta e preparação de amostras do solo	36
5.4 Análises físicas do solo	36
6. RESULTADO	39
6.1 Sistemas de uso da terra sob os parâmetros físicos do solo	39
6.2 Correlação de Pearson	50
6.3 Análises de componentes principais	57
7. DISCUSSÃO	60
8. CONCLUSÕES	66
9. REFERENCIAS	67

RESUMO

Os atributos físicos do solo desempenham um papel fundamental na determinação da qualidade e capacidade do solo em fornecer serviços ecossistêmicos, como a retenção de água e o fornecimento de nutrientes em diferentes sistemas de uso da terra. Diante disso, objetivou-se avaliar se diferentes sistemas de uso afetam os atributos físicos do solo. Foram selecionadas quatro áreas de estudo no município de Humaitá, sul do estado do Amazonas: floresta natural, pastagem, mandioca e açaí. Em cada área, realizou-se um transecto com quinze pontos amostrais. Em cada ponto, foram coletadas amostras de solo indeformado e em anéis volumétricos, nas camadas de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm, secas à sombra e destorroadas para obter os agregados e terra fina. No laboratório, foram analisados os seguintes atributos: densidade do solo, resistência a penetração do solo, análise granulométrica, porosidade do solo, diâmetro médio geométrico, diâmetro médio ponderado, classe dos agregados, umidade volumétrica, e matéria orgânica do solo. Dos resultados foram verificados os supostos de normalidade e homoscedasticidade ao 5% de significância ($P \geq 0,05$), quando aceitos foi realizada a ANOVA e, se significativos, as médias foram comparadas com o teste de Tukey ao 5% de nível de significância ($P < 0,05$). A conversão da floresta natural para os sistemas de uso impactou negativamente os agregados > 2 mm. Os sistemas de pastagem ($DS = 1,50 \text{ mg cm}^{-3}$) aumentam a densidade do solo em 26% para ambas as profundidades, em comparação com a área sob floresta natural, mandioca e açaí. A resistência do solo à penetração varia significativamente ($P < 0,05$) entre a pastagem ($RSP = 3,6 \text{ MPa}$) e a floresta natural ($RSP = 2,67 \text{ MPa}$), com um aumento de 34%. A porosidade total do solo para as áreas sob açaí, mandioca e pastagem mostraram-se semelhantes, entre si ($P \geq 0,05$). Apenas o sistema de pastagem na profundidade 0-5 cm ($PT = 0,45 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e profundidade 5-10 cm ($PT = 0,46 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) apresentou diferenças significativas em relação à floresta natural com uma redução de 7% a 8% em ambas as profundidades ($P < 0,05$), respectivamente. Esses resultados indicam que a conversão da floresta em sistemas de manejo, como pastagem, mandioca e açaí causam alterações nos atributos físicos do solo. Essas alterações podem ter consequências na qualidade do solo e na produtividade das culturas. Portanto, é importante considerar esses impactos ao desenvolver práticas de manejo sustentável para a região.

Palavras-chaves: Densidade do solo; Resistência do solo à penetração; agregados do solo; Porosidade total do solo.

ABSTRACT

The physical attributes of the soil play a fundamental role in determining the quality and capacity of the soil to provide ecosystem services such as water retention and nutrient supply in different land use systems. With this in mind, we aimed to assess whether different land use systems affect the soil physical attributes. Four land use systems (LUS) were selected in Humaitá, Amazonas, Brazil: Natural Forest, Pasture, Cassava, and Acai. A transect with fifteen sampling points was carried out in each LUS. At each point, disturbed and undisturbed soil samples were collected in the 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, and 20-40 cm layers, dried in the shade, and crushed to obtain aggregates and fine soil. In the laboratory, the following attributes were analyzed: soil density, soil penetration resistance, granulometric analysis, soil porosity, geometric mean diameter, weighted mean diameter, aggregate class, volumetric soil water content, and soil organic matter. The results were subjected to statistical analysis, verifying the assumptions of normality and homoscedasticity at a 5% significance level ($P \geq 0.05$). ANOVA was then carried out; if significant, the Tukey test was conducted at a 5% significance level ($P < 0.05$). It was found that the pasture showed an increase in soil density of 26% in the 0-5 cm and 5-10 cm layers, compared to the areas under natural forest, cassava, and acai. Soil penetration resistance varied significantly ($P < 0.05$) between pasture and natural forest, with an increase of 34%. The total soil porosity for the areas under acai, cassava, and pasture was similar ($P \geq 0.05$) in the 0-5 cm and 5-10 cm layers. However, the pasture in the 0-5 cm and 5-10 cm layers showed significant differences from the natural forest, with a 7% and 8% reduction in both layers ($P < 0.05$). We conclude that the conversion of natural forests into LUSs, such as pasture, cassava, and acai, causes changes in the physical attributes of the soil, affecting soil quality.

Keywords: Soil bulk density; Soil penetration resistance; Soil aggregates; Soil total porosity.

1. INTRODUÇÃO

O solo representa um conjunto complexo de elementos naturais, integrando compartimentos sólidos, líquidos e gasosos, composto por materiais orgânicos e minerais, ocupando a maior parte da camada superficial terrestre nas extensões continentais. Trata-se de um ambiente que abriga matéria viva e pode ser vegetado na sua forma natural (SANTOS et al., 2018). Desse modo, o solo é considerado um recurso natural não renovável na escala da existência humana, mas fundamental para a produção de bens de consumo, agricultura, pecuária e florestas cultivadas e prestação de serviços ecossistêmicos essenciais a vida (CLUNES et al., 2022). A exemplo da região Amazônica brasileira que sustenta amplas florestas tropicais abertas e densas, assim como atividades agrícolas, pecuárias e agrofloreais (OLIVEIRA et al., 2015b).

Devido ao desmatamento de ambientes naturais para sistemas agropecuários, o solo tem sofrido um crescente processo de degradação. Diversos estudos mostram que quando a cobertura vegetal é removida, o solo perde sua proteção natural (FERREIRA; FILHO; FERREIRA, 2010). Logo, imediatamente a qualidade do solo sofre impactos negativos que afetam a sua produtividade. Além disso, tornando-se susceptível à erosão hídrica, poluição ambiental e, conseqüentemente, aumentando os custos de produção (TELLES et al., 2013). Então, a degradação do solo entende-se como a redução da agregação do solo, porosidade, umidade, densidade do solo, assim como o aumento da resistência do solo à penetração, que são, de fato, conseqüências de práticas de manejo inadequadas, as quais podem variar de acordo ao manejo inerente dos sistemas de uso da terra (SILVA et al., 2021a). Em um sistema de pastagem intensivo, por exemplo, o exercício de carga animal por hectare compacta o solo, reduz a sua porosidade e capacidade de retenção de água, resultando em erosão e perda de nutrientes (STEFANOSKI et al., 2013a).

Entre outros sistemas de uso da terra, o açazeiro, com seu denso sistema radicular, reduz a lixiviação de matéria orgânica no solo e melhora sua estrutura, promovendo porosidade e condutividade hidráulica (FREITAS et al., 2020). Contudo, o uso de maquinário pesado e a remoção frequente de folhas e ramos podem comprometer a cobertura vegetal do solo, aumentando a vulnerabilidade à erosão, especialmente em períodos chuvosos (SANTOS et al., 2017). Nos sistemas de cultivo

de mandioca, a aração intensiva e eventual uso de agroquímicos diminuem a matéria orgânica e afetam a microbiota do solo, levando à compactação e redução na retenção de água, assim como a redução da fertilidade do solo (LIMA et al., 2015). Assim, como é observado, as práticas antrópicas nos sistemas de uso da terra, quando administradas de forma inadequada, podem promover o aumento da compactação e erosão, impactando assim de forma negativa a capacidade produtiva dos serviços ecossistêmicos do solo.

De acordo com Lorenzoni-Paschoa et al. (2019) a mitigação dos impactos que afetam a qualidade do solo precisa focar em políticas que incentivem o condicionamento físico do solo baseada em evidências científicas que incentivem as boas práticas de uso da terra. Em geral, as condições favoráveis que permitem o equilíbrio da qualidade produtiva do solo. Esses limites incluem uma densidade do solo crítica entre 1,4 e 1,8 g cm⁻³, sendo 1,4 a 1,6 g cm⁻³ para solos argilosos e 1,6 a 1,8 g cm⁻³ para solos franco-arenosos, além de uma resistência à penetração de até 2 MPa e uma porosidade total entre 0,10 e 0,15 m³ m⁻³ (Reynolds et al., 2002). Assim, é imperativo seguir esses parâmetros estabelecidos para garantir condições ideais para o desenvolvimento das plantas e para minimizar os impactos negativos decorrentes de mudanças no solo (YANG; SIDDIQUE; LIU, 2020).

Aplicar estratégias como a rotação de culturas, alternando diferentes espécies em um mesmo terreno para evitar a exaustão do solo e a implementação de sistemas agroflorestais, ocupação do solo com árvores plantadas ou manejada em associação com culturas agrícolas ou forrageiras são fundamentais para proteger o solo, reduzir a erosão e aprimorar seus atributos da sua qualidade física e química do solo (BRAVO-MEDINA et al., 2021). Essas práticas são essenciais para promover a sustentabilidade do solo e otimizar suas condições para a agricultura, deixando o solo dentro dos seus limites críticos, mantendo os serviços ecossistêmicos do solo sendo fundamentais para sustentar a vida e a produção de bens e serviços essenciais (fornecimento de alimentos, fibras e energia, armazenamento e purificação de água, neutralização, filtragem e buffer de poluentes) (PRADO et al., 2016).

Dessa maneira, a avaliação da qualidade física do solo se torna fundamental, pois ela é sensível às variações de uso da terra, sejam pela conversão de Floresta Natural em áreas agrícolas ou por outros métodos de uso da terra (Ex.: pastagem para criação de gado). Sabemos que a qualidade do solo desempenha um papel vital na

identificação de possíveis alterações decorrentes desses fatores, sendo fundamental promover o uso adequado da terra para garantir a sustentabilidade ambiental e a produtividade agrícola na região sul do Amazonense. Tais práticas devem estar embasadas em conhecimentos científicos atualizados e adaptadas às características específicas de cada localidade.

Considerando esses impactos, espera-se que áreas submetidas a atividades intensivas, como sistemas de cultivo pastagem, cultivo de açaí e cultivo de mandioca, apresentem diferenças significativas da qualidade física do solo quando comparado com Floresta Natural, sendo evidenciada por sinais do aumento da compactação do solo, redução na porosidade, umidade volumétrica, densidade do solo e resistência à penetração, bem como diminuição do teor de matéria orgânica.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a qualidade física do solo em diferentes sistemas de manejo, comparando sistemas de uso da terra com floresta natural, na região Sul do Amazonas.

2.2 Objetivos Específicos

- i) Avaliar a qualidade do solo por meio da determinação dos atributos físicos do solo, quando comparados aos sistemas de manejo;
- ii) Quantificar os atributos físicos do solo, densidade, porosidade, resistência e textura, classes dos agregados nas áreas de cultivo da cultura do açaí, área de cultivo da cultura da mandioca, áreas de pastagens e floresta natural, no sul do Amazonas;
- iii) Determinar a matéria orgânica dos solos sob cultivo de mandioca, açaí, pastagem e floresta, no sul do Amazonas

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Classes de solos do Amazonas

O solo é uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, formados por materiais orgânicos e minerais que ocupam a maioria do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta, contêm matéria viva e podem ser vegetados na natureza onde ocorrem (SANTOS et al., 2018). Ao longo de seu desenvolvimento, o solo atravessa diferentes estágios de formação, incluindo perdas, transformações, transportes e adições (SCHOONOVER; CRIM, 2015). Esses estágios são fundamentais para a transformação de rochas em solo, pois resultam na formação de camadas distintas verticalmente, com variações na cor, espessura, tamanho de grãos, teor de matéria orgânica e nutrientes vegetais, o clima exerce uma forte influência na formação do solo, através da sua ação sobre a temperatura, precipitação, ventos e radiação solar (HARRISON; STRAHM, 2008).

Essa interação desencadeia uma série de fenômenos físicos, químicos e biológicos, conhecidos como intemperismo, que resultam em diversas modificações, essas modificações são responsáveis pelo início da formação do solo, que por sua vez pode ser identificado e classificado de acordo com suas características específicas (LEPSCH, 2016a). O solo possui classificações de acordo com suas características, as quais são de grande importância, pois permite conhecer as qualidades e limitações do solo de cada região, facilitando empregar o uso e manejo mais adequado (HARRISON; STRAHM, 2008). O solo sofre modificações devido às ações humanas, o que pode alterar suas características e composição (TRABAQUINI et al., 2011).

No estado do Amazonas, os solos predominantes são os Latossolos e Argissolos (CAMPOS et al., 2012). Além disso, é possível encontrar também em menor escala os Cambissolos, Plintossolos, Espodossolos, Gleissolos, Neossolos Flúvicos e Neossolos Quartzzaênicos, cerca de 17% desses solos apresentam algum tipo de hidromorfismo, como a gleização, sendo que os solos predominantes são do tipo distróficos ou álicos, como mencionado por (DAMACENO, 2020).

Figura 1. Principais classes de solos dominantes no estado do Amazonas e seu percentual em relação à área total do estado.

Classes de solo	Descrição	Área percentual (%)	
		Brasil	Amazonas
Argissolos Amarelos	Solos com acumulação de argila no horizonte B. sendo estes caracterizados por seu alto grau de intemperismo, possuindo características físicas adequadas ao uso agrícola, no entanto com fortes limitações nutricionais.	26,90	44,8
Espodossolos	Solos com alto teor de areia, que apresentam horizonte B espódico que acumula matéria orgânica.	2,70	7,14
Gleissolos Hápicos	Solos com cores acinzentadas, com alta saturação de água, caracterizados por um horizonte superficial cinzento a preto rico em matéria orgânica. Sendo em sua quase totalidade férteis quando ocorrem nas margens dos rios de águas barrentas (Solimões, Madeira, Purus, Juruá, dentre outros)		8,97
Latossolos Amarelos	Solos altamente intemperizados em relação à rocha de origem, profundos, com grande desenvolvimento do horizonte B. São solos profundos, bem drenados e com baixa capacidade de retenção de água. Apresentam coloração vermelha ou amarela e são ricos em óxidos de ferro e alumínio, são de baixa fertilidade natural (distróficos), argilosos ou muito argilosos. Os Latossolos predominam em áreas de relevo plano a ondulado e são importantes para a produção agrícola. concentra próximo à região central do estado nas áreas de terra firme	31,60	26,08
Neossolos	Solos jovens em início de formação (sem presença de horizonte B).	13,20	3,24
Plintossolos Hápicos	Solos que possuem horizonte B apesar de ocorrerem em relevo plano e suave ondulado, propícios à mecanização, apresentam limitações devido à reduzida	7,00	3,50

	drenagem e baixa. são os solos predominantes nos campos e cerrados do sul do estado do Amazonas principalmente nos municípios de Humaitá, Lábrea e Canutama		
--	---	--	--

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2011); Teixeira et al. (2010).

De acordo com um estudo realizado por Teixeira et al. (2017), as classes de solo no Estado do Amazonas, apresentam características físicas, químicas e biológicas distintas devido às condições de clima, relevo, vegetação e tempo de formação, caracterizado por solos bastante heterogêneos, com distintas combinações de textura, minerais, nutrientes e elevações topográficas. Os solos na região sul do estado, abrangendo os municípios de Humaitá, Lábrea e Canutama, nessa região, há a predominância dos Plintossolos, que representam 3,5% do solo do Amazonas e são mais comuns em áreas de cerrados ou campos. Esses solos são altamente heterogêneos, apresentando variações de textura, minerais, nutrientes e elevações topográficas (TEIXEIRA et al., 2010).

Além disso, a região sul do estado possui configurações naturais significativas e é utilizada para fins agrícolas. A maioria do território local é coberta por florestas, sendo as Florestas tropicais densas o tipo de vegetação mais característico (OLIVEIRA et al., 2015b). No entanto, essas áreas apresentam solos de baixa fertilidade, representando 70% do total do solo na região (TEIXEIRA et al., 2017). Infelizmente, as perturbações causadas pela ação humana, associadas ao desmatamento ilegal, têm levado à degradação desses solos (LORENZONI-PASCHOA et al., 2019).

A modificação desses ambientes pelo homem, conhecida como processo antrópico, leva a alterações na sua estrutura, como o aumento da compactação do solo (CAMPOS et al., 2012a). Isso ocorre principalmente em áreas de pastagem devido ao intenso pisoteio dos animais e ao uso de maquinário agrícola, o que resulta em influências negativas nas culturas. A compactação do solo dificulta o crescimento das raízes, pois aumenta a resistência à penetração e reduz a capacidade de infiltração de água no solo. Essa influência negativa também afeta a absorção de nutrientes pelas plantas, resultando no aumento do uso de irrigação e no elevado consumo de combustível, o que aumenta os custos de produção. Além disso, a

compactação do solo também pode diminuir o nível dos lençóis freáticos e contribuir para a poluição ambiental (CAVALIERI, 2007).

A retirada da vegetação do solo para o manejo é um fator adicional de degradação do solo porque aumenta a suscetibilidade à erosão hídrica. Quando a cobertura vegetal é removida, o solo perde sua proteção contra a ação das chuvas, o que pode resultar em perdas significativas de solo. Além disso, a remoção da cobertura vegetal diminui a capacidade produtiva do solo, uma vez que a presença de plantas ajuda a reter a água no solo e reduzir a evaporação. Portanto, é importante manter uma cobertura vegetal adequada no solo para evitar a erosão e preservar sua capacidade produtiva (FERREIRA; FILHO; FERREIRA, 2010).

Stefanoski (2013) ressalta a importância de investigar e monitorar áreas de manejo que possuem recursos limitados e propriedades do solo que levam um longo período para serem restauradas. Essa investigação é fundamental para obter informações que possam ser utilizadas na aplicação de técnicas que visem melhorar a qualidade desses solos.

A degradação dos solos está relacionada à alteração de suas propriedades físicas, químicas e biológicas, resultante de práticas de manejo inadequadas implementadas no campo. Essas práticas incluem compactação do solo, erosão, redução do teor de carbono orgânico e diminuição da atividade biológica, levando à diminuição de sua capacidade de produção. Para melhorar a qualidade do solo, é necessário adotar boas práticas de uso e manejo (LORENZONI-PASCHOA et al., 2019).

3.2 Qualidade do solo

Ao longo da história, o solo tem sido a principal fonte de subsistência para a humanidade, especialmente quando a agricultura se tornou a principal forma de sobrevivência. Além disso, o solo desempenha funções vitais no ecossistema, fornecendo nutrientes essenciais para florestas e cultivos, purificando a água, regulando a temperatura e reduzindo as emissões de gases de efeito estufa. O reconhecimento do valor dos serviços ecossistêmicos prestados pelo solo para as sociedades humanas tem evoluído ao longo do tempo, dependendo da base cultural e econômica de uma determinada sociedade em um determinado contexto (PARRON et al., 2015).

A qualidade do solo é determinada pela interação entre seus componentes físicos, químicos e biológicos (RIBEIRO, 2021). Esses componentes incluem a estrutura do solo, sua textura, porosidade, capacidade de retenção de água, nutrientes disponíveis, pH, matéria orgânica e diversidade de microrganismos (MANHAES; FRANCELINO, 2012). A capacidade do solo de desempenhar funções essenciais está diretamente ligada à sua qualidade, ele fornece nutrientes necessários para o crescimento das plantas, retém a água e regula o ciclo hidrológico, evitando enchentes e ajudando na recarga dos lençóis freáticos. Além disso, o solo é capaz de armazenar carbono, ajudando a mitigar as mudanças climáticas, albergar a biodiversidade e sustentar as atividades humanas (FERREIRA; FILHO; FERREIRA, 2010).

Portanto, é essencial ter um conhecimento aprofundado sobre as características e propriedades químicas e físicas do solo, isso é crucial para garantir um manejo adequado, escolher os insumos adequados e alcançar produções mais rentáveis (RONQUIM, 2020). Algumas atividades humanas, como o desmatamento indiscriminado para fins agrícolas e pecuários, estão resultando na perda de produtividade do solo de maneira predatória. Essas práticas estão contribuindo para a redução da qualidade do solo, diminuição da disponibilidade de água e aumento de temperatura, além de alterações no regime de chuvas, o que favorece a erosão e até mesmo a desertificação de grandes áreas (MICCOLIS et al., 2016).

A qualidade química do solo se refere às características fundamentais relacionadas aos nutrientes e elementos químicos presentes no solo (WASTOWSKI et al., 2010). Assim como a disponibilidade e a capacidade do solo de suprir as necessidades das plantas (CARMO et al., 2012). É importante ter um solo com qualidade adequada para garantir o crescimento saudável das plantas e a produção agrícola.

Qualquer alteração no uso da terra, mesmo que seja mínima, tem impactos diretos ou indiretos nos atributos químicos e afeta a qualidade do solo. Isso ocorre porque modifica a forma como os nutrientes são clicados e como a matéria orgânica é decomposta, resultando em uma diminuição da fertilidade do solo e, conseqüentemente, da sustentabilidade das práticas agrícolas (DE SOUZA BRAZ; FERNANDES; ALLEONI, 2013). Estudos mostram que a conversão de floresta em área de cultivo convencional resultou em redução nos níveis de fósforo (P), cálcio

(Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), soma de bases, capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva e potencial, além da matéria orgânica (MOS) (SOUSA et al., 2017).

Um estudo na região norte do Pará indicou que a MOS foi o principal atributo químico do solo, diretamente afetado após a conversão da vegetação original para pastagem, sistema agroflorestal e cultivo de mandioca (SILVA JUNIOR; BOECHAT; CARVALHO, 2012). Para Cardoso et al. (2011) As pastagens promoveram perda da qualidade química do solo, notadamente na camada de 010 cm, evidenciada pela redução nos teores de MOS e de cátions trocáveis (Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺), CTC a pH 7,0 e CTC efetiva, na pastagem cultivada, implantada em substituição à vegetação arbórea nativa, bem como pela redução na CTC a pH 7,0 e teor de MOS na pastagem nativa submetida ao sistema de pastejo contínuo.

As propriedades químicas do solo sofrem alterações significativas devido à remoção da vegetação natural e ao cultivo, especialmente em áreas destinadas à agricultura. Essas mudanças são causadas pela adição de corretivos e fertilizantes, bem como pelas atividades agrícolas. Vários fatores podem influenciar essas mudanças, como o tipo de cultura plantada e as práticas de manejo utilizadas, além da fertilidade inicial do solo (FIGUEIREDO, 2020).

O solo desempenha um papel fundamental no funcionamento do ecossistema, pois abriga uma grande diversidade de organismos vivos e possibilita suas atividades biológicas (SILVA et al., 2021b). A maneira como o solo é manejado é uma das principais causas da baixa biodiversidade local, causando perda de nutrientes e microorganismos benéficos (CARMO et al., 2012). A baixa biodiversidade local também pode ser atribuída à falta de práticas de conservação do solo, como a ausência de áreas de preservação, a falta de rotação de culturas e a ausência de técnicas de manejo sustentáveis (ALVES, 2021). Os microrganismos do solo, são responsáveis pela quebra de materiais orgânicos, convertendo-os em nutrientes disponíveis para as plantas, atuam melhorando a estrutura do solo, além disso, eles também formam simbiose com as raízes das plantas, promovendo a absorção de nutrientes e proporcionando resistência a doenças (CARDOSO; ANDREOTE, 2020).

Organismos maiores, como ácaros, minhocas, insetos e outros, desempenham um papel crucial no solo ao penetrarem nele. Essa ação melhora a porosidade e agrega as partículas do solo, resultando em um aumento na capacidade de retenção

de água e na aeração do solo. Além disso, insetos como as formigas desempenham funções importantes, como a dispersão de sementes e a decomposição de material orgânico (BROWN et al., 2015).

A diversidade e abundância desses organismos no solo são influenciadas por fatores como tipo de solo, técnicas agrícolas, cobertura vegetal (BACKES, 2017). Por essa razão, é crucial cuidar do aspecto biológico do solo para garantir sua saúde e fertilidade. Isso pode ser alcançado por meio de técnicas como a rotação de culturas, a adição de matéria orgânica, a redução do uso de substâncias químicas e a manutenção adequada da irrigação.

As práticas agrícolas, como queima, gradagem, plantio direto, entre outras, têm um impacto direto ou indireto nos microrganismos e na fauna edáfica, importantes para o solo ao longo do tempo, desempenhando funções cruciais na ciclagem de nutrientes. O solo é um dos habitats mais complexos do mundo devido à sua natureza biológica ainda não completamente compreendida (REDIN et al., 2011).

Balota (2017), no segundo capítulo de seu livro aborda os indicadores biológicos, eles podem ser usados para desenvolver índices biológicos de qualidade do solo. No entanto, o conhecimento sobre valores de referência para esses índices em diferentes condições de solo, clima e culturas é insuficiente, é necessário ampliar as avaliações da qualidade do solo em uma variedade de condições para melhor compreender a boa qualidade do solo em diferentes contextos.

Portanto, para promover a biodiversidade local, é essencial implementar práticas de manejo do solo mais conscientes e sustentáveis. Isso inclui o uso de técnicas de agricultura orgânica, a implementação de áreas de preservação, a restauração de habitats naturais e a adoção de sistemas de manejo sustentáveis. Essas medidas ajudarão a proteger e melhorar a saúde do solo, permitindo o florescimento de uma maior diversidade de vida vegetal e animal.

3.2.1 Qualidade física do solo

A compreensão e avaliação dos indicadores de qualidade do solo (QS) tem sido identificada como uma das principais responsabilidades da ciência do solo. Isso ocorre devido a uma conscientização crescente sobre a importância do solo para a qualidade ambiental, a sustentabilidade agrícola e sua função nesse contexto (CARDOSO et al.,

2013;LIMA et al., 2013). A avaliação da qualidade física do solo é crucial para determinar o seu grau de degradação e identificar práticas de uso sustentável (SILVEIRA, 2019).

No início da década de 1990, houve um movimento global dedicado a estudar a degradação dos recursos naturais e a importância do solo nesse processo, foi nesse contexto que surgiu o conceito de QS, diversas definições foram propostas ao longo dos anos, mas uma delas, formulada por Karlen et al. (2013) e Doran & Parkin(1994) se destaca. Eles conceituaram a QS como a capacidade de um tipo específico de solo de funcionar dentro dos limites de ecossistemas naturais ou manejados, sustentando o crescimento de plantas, a produtividade animal, a qualidade do ar e da água, além de apoiar a saúde humana e proporcionar condições adequadas de habitação. Desse modo, compreender e avaliar os indicadores de qualidade do solo é uma prioridade na ciência do solo, já que isso permite uma gestão adequada do solo e dos recursos naturais, garantindo assim a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e a qualidade ambiental.

Quando o solo passa por um processo de produção, observam-se modificações em seus atributos, sendo que a degradação dessas características representa um dos principais fatores responsáveis pela perda de qualidade. Para avaliar a qualidade do solo, é necessário monitorar uma série de parâmetros que sofrem alterações devido às mudanças no manejo ou influências externas (FREITAS et al., 2017).

As características físicas do solo sofrem alterações quando submetido a processos de produção, e a perda de qualidade do solo está relacionada à degradação dessas características (BAUMHARDT; STEWART; SAINJU, 2015). É importante estudar essas modificações resultantes do uso e manejo do solo para avaliar e monitorar sua qualidade física, visando o desenvolvimento de sistemas de produção sustentáveis (FREITAS, 2011). A análise das alterações do solo pode ser feita considerando aspectos como textura, classes dos agregados, resistência à penetração, índice de compressão, porosidade, capacidade de retenção de água, permeabilidade, compactação e erosão do solo (LIN et al., 2022).

Em seu estudo realizado avaliando a qualidade física do solo, Cherubin et al. (2015), observaram que, independentemente do aumento nos valores de densidade, e resistência à penetração do solo, existe uma diminuição na macroporosidade e porosidade total na maioria dos tratamentos, em comparação com o solo de mata

nativa. Portanto, os resultados indicaram que os sistemas agrícolas com manejo causam alterações significativas nos atributos físicos do solo, levando a compactação de suas camadas superficiais.

Cardoso et al. (2011) realizaram um estudo onde avaliaram os atributos físicos do solo. Os resultados encontrados indicaram um aumento na densidade do solo e na resistência da penetração, além de uma redução na porosidade total, macroporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado em todas as áreas com pastagens. Foi observado que a resistência do solo à penetração apresentou um comportamento semelhante ao da densidade do solo, indicando uma leve tendência à compactação nas áreas de pastagens, a compactação do solo devido ao pisoteio do gado reduz a porosidade total, a macroporosidade e a capacidade do solo de conduzir água, resultando em maior densidade do solo e resistência à penetração (CARDOSO et al., 2011).

Os indicadores da qualidade física do solo proporcionam uma abordagem mais simplificada e eficiente na avaliação desse aspecto. A curva de retenção de água no solo, por exemplo, mostra como o solo retém ou libera água em diferentes pontos de umidade, permitindo a identificação de propriedades como capacidade de retenção de água e facilidade de drenagem (SANTOS et al., 2011). A porosidade indica a quantidade de espaço vazio no solo, essencial para a circulação de ar e água, bem como para o crescimento das raízes das plantas (WERALUPITIYA et al., 2022).

3.3 Sistemas de uso da terra

O uso e manejo do solo refere-se à forma como os seres humanos utilizam e gerenciam as terras para diversos fins, como a agricultura, pecuária, construção de infraestrutura urbana, mineração, entre outros. É importante haver um equilíbrio entre o uso do solo e a preservação do meio ambiente, garantindo sua sustentabilidade para a produção agrícola e para as gerações futuras (ALVES; AZEVEDO, 2011). A produção agrícola depende de um conjunto de fatores relacionado ao uso do solo (DE MENESES et al., 2020). Incluindo algumas práticas comuns de manejo do solo.

O mais adequado seria aquele uso e manejo da terra que criasse uma associação adequada de propriedades físicas, químicas e biológicas para permitir condições cada vez melhores para o desenvolvimento das plantas, promovendo assim menores perdas de solo e água e, conseqüentemente, maior produtividade associada

à qualidade ambiental (STEFANOSKI et al., 2013b). A rotação de culturas uma técnica que consiste em alternar culturas de diferentes espécies em um mesmo terreno, evitando o esgotamento do solo (FRANCHINI et al., 2011).

Agricultura de conservação se aplica a um conjunto de práticas agrícolas que visam à preservação dos recursos naturais, como a adoção de sistemas agroflorestais, o controle do uso de agrotóxicos e a conservação do solo (FREIXIAL; CARVALHO, 2013). Irrigação é uma técnica que consiste em fornecer água às plantas para um melhor desenvolvimento. Porém, o uso inadequado da água pode levar à salinização do solo e à contaminação da água subterrânea (RIVERA, 2021). A adubação consiste em fornecer nutrientes ao solo para o desenvolvimento das plantas. O excesso de adubação pode contaminar o solo e a água. Uso de terraços: técnica que consiste em construir rampas em terrenos íngremes para evitar a erosão do solo (KLEIN; KLEIN, 2014).

Plantio direto é uma técnica que consiste em semear as sementes diretamente na palha da cultura anterior para evitar a degradação do solo e reduzir o uso de maquinaria (RIVERA, 2021). Sendo importante proteger as áreas de matas e florestas, pois elas contribuem para a preservação do solo, reduzem a erosão e regulam o fluxo de água e nutrientes no ecossistema. O mau uso do solo influencia na alteração dos atributos químicos, físicos, mineralógicos e biológicos, perdendo assim sua produtividade. O solo está considerado dentre o recurso natural mais degradado pelo homem, pois vem sofrendo alterações em suas características (TIECHER, 2016).

Quando o solo sofre alteração mediante processos naturais ou ação antrópica, este sofre alteração em sua quantidade e qualidade de biomassa, quando comparado com floresta natural, ações serão necessária via manejo adequado, para controlar a degradação e manter a sustentabilidade econômica do solo (VIANA et al., 2011a).

3.3.1 Floresta Natural

A floresta tropical amazônica é a maior e mais diversificada região de floresta tropical do mundo (PHILLIPS et al., 2008). Possui um papel vital na manutenção da biodiversidade, ciclos hidrológicos e climáticos (OLIVEIRA, 2020). No entanto, a conversão de áreas de vegetação nativa em pastagens e cultivo agrícola tem provocado grandes alterações relacionadas à sustentabilidade destes sistemas,

resultando em diminuição da capacidade produtiva do solo (DE SOUZA BRAZ; FERNANDES; ALLEONI, 2013).

Assim como outras florestas tropicais sofrem mudanças no uso da terra, por meio da substituição da floresta por áreas de cultivo, pastagens e outras atividades agrícolas, essas mudanças influenciam os processos hidrológicos dos solos devido à alteração nas propriedades hidráulicas do solo (SCHEFFLER et al., 2011).

A Floresta Amazônica apresenta uma rica diversidade, sua extensão chega aproximadamente 7,5 milhões de km² (PAVÃO et al., 2017). Desta grande parte ocupa o território brasileiro, cerca de 4,2 milhões de quilômetros quadrados, o bioma Amazônia ocupa cerca de 49,29% do território brasileiro, sendo o maior bioma brasileiro (FRANTZ et al., 2017). Ocupando sete estados da região norte (Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins), norte de Mato Grosso e oeste do Maranhão (ARRUDA; SILVA; NORA, 2023). Apresentando maior parte floresta pluvial e de terra firme. Este apresenta maior parte, solos de baixa fertilidade e pH, sofrem sua retirada para o uso do solo (RAMOS, 2018). essas conversões de florestas em sistema de manejo continua aumentando na Amazônia, as formações de pastagens e a agriculturas e queimas são as principais causas do desmatamento na região (REGO; KATO, 2018).

A diversidade das florestas desempenha um papel crucial na disposição de nutrientes no solo e na produção de biomassa vegetal (BELLO, 2019). A presença de diferentes espécies de árvores, plantas e microrganismos em uma floresta cria uma interação complexa que resulta na adoção de estratégias variadas de captação e uso de nutrientes. Devido às regiões dos trópicos abrigarem áreas onde pode ser encontrada solo de pouca fertilidade, isto é, níveis de nutrientes em valores baixos, o solo da Amazônia é pobre em nutrientes como fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), mas é rica em óxidos de ferro e alumínio, sendo a floresta importante na dinâmica e equilíbrio (BRAGA, 2011).

Folhas caídas no chão, ricas em carbono (C) e nutrientes (GODINHO, 2016) logo que é depositada no solo, procede o início da decomposição com ação inicial da fauna edáfica em degradar o material e posteriormente ação dos microrganismos em decompor e, por fim, a liberação dos nutrientes minerais que constituem os tecidos orgânicos (LEPSCH, 2016).

Uma das principais causas da degradação do solo, ocorre devido o processo de desmatamento, a qual se associado a vários fatores como, crescimento populacional, produção agrícola, produção industrial, agropecuária, dentre outros. O processo de queimada e desmatamento ocasionam uma série de fatores negativos, como a degradação do solo, erosões, lixiviação, acidificação, escoamento superficial, diminuição de água no solo entre outras consequências (SILVA et al., 2018).

3.3.2 Cultivo de açaí

O açaí (*Euterpe oleracea* Mart) é uma palmeira nativa brasileira que pode ser encontrada em áreas de várzea e florestas inundadas ao redor do estuário do rio Amazonas (MINIGHIN et al., 2020). Apresenta valor socioeconômico para Amazônia (BEZERRA; FREITAS-SILVA; DAMASCENO, 2016). Segundo Melo, Costa e Silva(2021). houve um aumento significativo na produção o de açaí no estado do Amazonas nos últimos anos, entre 2013 e 2017, a produção alcançou aproximadamente 67.537,7 toneladas. Nesse período, o estado do Amazonas ficou em segundo lugar em termos de produção, ficando atrás apenas do estado do Pará, que registrou uma produção de 120.127,7 toneladas.

Segundo Ferreira (2017), O estado do Pará é o principal centro de dispersão natural desta palmeira, o Amazonas se torna o segundo maior produtor, populações espontâneas também podem ser encontradas nos estados do Amapá, Maranhão, Mato Grosso e Tocantins, bem como em países da América do Sul (Venezuela, Colômbia, Equador, Suriname e Guiana) e Central América (Panamá).

O plantio do açaizeiro em terra firme é uma excelente forma para recuperação áreas desmatadas, além de reduzir a pressão sobre o frágil ecossistema de várzea, evitando sua transformação em bosques homogêneos (JESUS et al., 2021). O açaizeiro também está sendo utilizado em projetos de reflorestamento devido à sua importância na preservação da biodiversidade e na recuperação de áreas degradadas. A produção dessa árvore está intimamente ligada à fertilidade do solo, sendo os nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio essenciais para o seu desenvolvimento saudável, no entanto, a disponibilidade limitada desses nutrientes nos solos da Amazônia pode não suprir as necessidades das plantas (SOUSA, 2016).

O açaizeiro, com seu denso sistema radicular, reduz a lixiviação de matéria orgânica no solo e melhora sua estrutura, aumentando porosidade e condutividade

hidráulica (FREITAS et al., 2020). Contudo, práticas como o uso de maquinário pesado e a remoção frequente de folhas e ramos comprometem a cobertura vegetal do solo, aumentando a vulnerabilidade à erosão, especialmente em períodos chuvosos (NETO et al., 2018a)

Embora possua importância socioeconômica reconhecida, e as áreas cultivadas com a espécie tenham aumentado nos últimos anos, informações sobre a qualidade do solo ainda são incipientes.

3.3.3 Cultivo de mandioca

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma planta que se adapta a solos ácidos, diferentes regimes pluviométricos, tolerância à seca e pouca exigência em fertilidade do solo (AJAYI; OLUTUMISE, 2018). No Brasil, a mandioca tem papel fundamental na alimentação humana e animal, assim como na produção de diversos produtos industriais e na geração de emprego e renda estima-se que durante a primeira etapa de produção e beneficiamento da farinha e fécula, o cultivo gera cerca de 10 milhões de empregos diretos e indiretos ao longo do ano todo o ciclo de produção (LIMA et al., 2022). Na Amazonia a farinha de mandioca está entre os principais alimentos da população (JESUS et al., 2021).

Nas plantações de mandioca a causa da degradação do solo se deve pela planta oferece pouca proteção a área, causando erosividade de chuva durante todo o ano, pois suas folhas não oferecem total cobertura ao solo, o que contribui para o aumento da perda da cobertura pedológica (LIMA et al., 2015).

A qualidade dos solos cultivados com mandioca muitas vezes é inferior em comparação a outros solos. Isso acontece devido à menor quantidade de material orgânico adicionado pelos resíduos culturais da mandioca, às características radiculares da planta e ao revolvimento do solo realizado durante a colheita. Esses fatores contribuem para a baixa disponibilidade de substrato orgânico, dificultando o aumento da biomassa microbiana (LIMA et al., 2015).

A preservação do solo deve ser uma preocupação constante dos produtores em qualquer atividade agrícola, pois o solo é um recurso essencial para a produção de alimentos. Os produtores devem estar cientes de que o solo é um patrimônio e precisa ser conservado e protegido (SILVA, 2016). Alguns estudos abordam a questão da perda de solo no cultivo da mandioca causado pela chuva. Por exemplo, de acordo

com Putthacharoen et al. (1998) constataram que as maiores perdas de solo para a cultura da mandioca ocorrem nos três primeiros meses após o plantio, devido ao espaçamento e crescimento inicial lento da cultura. Já Podwojewski et al. (2008) constataram perdas médias de solo de 2 a 7 toneladas por hectare ao ano e 16% do escoamento superficial para a cultura da mandioca, o que é cerca de 10 a 20 vezes maior em comparação com floresta. Lima et al. (2015) afirmaram que a mandioca foi responsável pelo aumento da fragilidade do solo, através da erosão hídrica, sendo um cultivo que requer uso de práticas agrícolas.

Os impactos da plantação de mandioca no meio físico são notáveis devido à modificação da paisagem natural. A derrubada da mata ciliar para a criação de pequenos portos onde são realizadas as atividades de cultivo da mandioca leva à desproteção do leito, resultando em erosão do solo. Esse processo é agravado no período das chuvas, quando o transporte de material ocorre de forma mais intensa (JESUS et al., 2021). A preservação do solo é de extrema importância na produção de mandioca e deve ser cuidadosamente considerada, tanto na escolha quanto na conservação da área de plantio.

A mandioca possui um ciclo de crescimento mais longo em comparação com outras culturas importantes. Em média, leva de 10 a 12 meses para crescer, podendo até levar 24 meses em alguns casos. Isso significa que os agricultores só podem cultivar mandioca uma vez por ano, ou em alguns casos, a cada dois anos. Durante o ciclo de crescimento, os primeiros cinco meses após o plantio são os mais sensíveis à falta de água. Nesse período, ocorre a formação das raízes verdadeiras e o armazenamento de carboidratos. Para obter uma produtividade adequada, a mandioca necessita de aproximadamente 750 mm de chuva bem distribuída ao longo dos 12 meses de cultivo (SILVA et al., 2021c)

3.3.4 Cultivo de pastagens

Nestes ecossistemas, há limitações físicas em termos de profundidade, topografia e capacidade de retenção de água. No entanto, como muitas pastagens brasileiras estão degradadas ou em processo de degradação, é essencial investigar e compreender como os atributos químicos e físicos do solo reagem à pressão de pastejo e entender as principais causas dessa degradação (PARENTE; MAIA, 2011).

A nível Brasil, Minighin et al. (2017) destacam que existem entre 50 e 60 milhões de hectares de pastagens cultivadas, estimando-se que 80% delas estejam em algum nível de degradação. Quando se considera a região amazônica, o nível de degradação chega a 57%, com maior destaque para os estados de Mato Grosso (76%), Tocantins (62%) e Rondônia (61%). O Acre é o estado com menor índice de degradação, com cerca de 22% da área afetada (MATOS, 2023). No estado do Amazonas, na região norte do Brasil, cerca de 70% das pastagens estão em alto grau de degradação (LANGE et al., 2019).

A degradação das pastagens causada pela compactação do solo tem impactos negativos no meio ambiente, na lotação animal e na economia, como a redução da produtividade e qualidade da forragem (LANGE et al., 2019). A compactação do solo ocasiona um aumento de massa por unidade de volume, levando ao aumento da densidade do solo, resistência penetração do solo, diminuição a porosidade, um aumento na microporosidade relativa. a macroporosidade são reduzidas de forma linear (STEFANOSKI et al., 2013b).

A compactação do solo não causa apenas problemas físicos no solo, afeta diretamente os microrganismos, pela redução de oxigênio, afetando a decomposição do material orgânico e a absorção de nutrientes pelas raízes. Rossi et al. (2016) relatam que a qualidade do solo é de suma importância para exercer ou não suas funções, que incluem a sustentação da produtividade de plantas e animais e a manutenção do ambiente equilibrado.

Parente e Maia (2011), ainda ressaltam que quando a pressão mínima para pré-consolidação dos solos não é atendida, o pisoteio animal promove alterações nestes atributos, fazendo com que ele se compacte. Em estudo comparativo entre área de floresta nativa e pastagem, Soares et al. (2016) verificaram que a resistência do solo a penetração aumentou em 30% quando comparado com floresta natural. Valores elevados foram verificados em Santos (2022), seu estudo mostrou que média geral da resistência do solo à penetração (RSP) de raízes em cada ambiente mostrou um aumento gradativo na seguinte ordem: floresta (0,97 MPa), mandioca (1,06 MPa), açaí (1,64 MPa) e pastagem (1,72 MPa), Na camada de 0,00-0,05 m, a área de pastagem apresentou os maiores valores de RSP, com uma média de 2,20 MPa. O valor crítico para desenvolvimento de plantas se aproxima de 2 Mpa (LAPEN et al., 2004).

Oliveira et al. (2015), investigou a resistência à penetração do solo em sistemas integrados, utilizando a mata nativa como padrão. Os resultados mostraram um aumento significativo da resistência à penetração, sendo as áreas de pastagem mais compactadas em comparação com áreas nativas, a qual associou ao pisoteio animal.

Pastagens cultivadas em regiões tropicais normalmente apresentam uma diminuição na produtividade após alguns anos de plantio, o que é atribuído ao mau manejo do solo e está normalmente associado à diminuição da fertilidade, ou até mesmo à sobre carga animal que causa danos às propriedades físicas e química do solo (PARENTE; MAIA, 2011). Cândido (2018), ressalta que algumas características do solo, quando alteradas, podem ser de difícil reversão e, certamente, explicam o grau de degradação da maioria das pastagens. O animal terá efeito nas propriedades físicas, enfatizando a influência das pastagens à compactação do solo, que provoca alterações na disponibilidade de nutrientes devido a alterações na mineralização da matéria orgânica ou resíduos vegetais e animais, bem como alterações na movimentação de nutrientes no solo.

Sendo fundamental vincular práticas sustentáveis para diminuir a degradação do solo usando métodos rápidos e práticos, na avaliação de áreas em diferentes graus de degradação relacionados com os atributos do solo, na identificação de parâmetros que devem apresentar maior expressão nos modelos quantificadores da degradação ambiental (NEVES NETO et al., 2013).

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida na região sul do Amazonas, no município de Humaitá, entorno da BR-319 no km 50, onde foram analisadas 04 (quatro) áreas experimentais, sob diferentes usos da terra, floresta, açcaizal, mandiocal e pastagem, localizadas na mesma posição do relevo (Figura 2).

A zona climática da região, segundo a classificação de Köppen, pertence ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) e tipo climático Am (chuvas do tipo monção), apresentando um período seco de pequena duração, com precipitação média anual variando entre 2.200 e 2.800 mm e, com período chuvoso iniciando em outubro e prolongando-se até junho, as médias anuais de temperatura variam em torno de 25°C e 27°C, a umidade relativa do ar varia entre 85% e 90% (ALVARES et al., 2013). Esses solos são formados por sedimentos aluviais recentes do período Quaternário. Eles são caracterizados por apresentarem relevos tabulares de grandes dimensões, com talvegues de aprofundamento muito fraco, ou seja, declives suaves e drenagem natural deficiente.

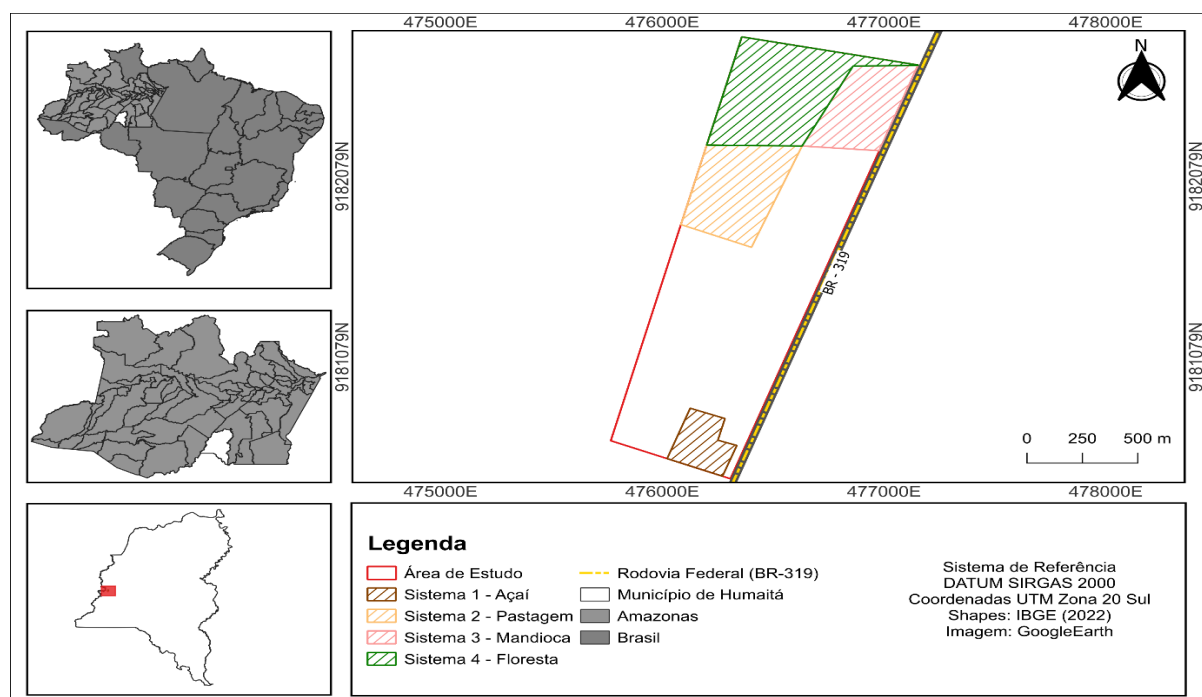


Figura 2. Mapa de localização aproximado da área de estudo com as áreas de pastagens, floresta, mandioca e açcaí.

5.2 Histórico dos sistemas de uso

As áreas de estudo localizam-se na região Sul do estado do Amazonas. Foram selecionadas quatro áreas, sendo três áreas manejadas (Açaí, Mandioca e Pastagem), uma área de floresta natural, utilizada como referência, (Tabela 1).

Tabela 1. Descrição de uso e histórico das áreas sob pastagem, mandioca, açaí e floresta na região sul do Amazonas

Áreas de estudos	Histórico de manejo
Floresta natural	Floresta tropical Ombrófila densa, cujo a vegetação é perenifólia, constituída por árvores adensadas e multiestratificadas entre 20 a 50 metros de altura.
Sistema de Pastagem	Área de pasto dentre 20 a 35 anos de manejo de pasto reformado. Práticas de calagem, mas sem adubação. Entre as espécies cultivadas
Sistema de Açaízal	O sistema de cultivo de açaí (<i>Euterpe oleracea</i>), apresenta um manejo em torno de dez anos com práticas de adubação anual, a área é irrigada regularmente.
Sistema de Mandioca	O ambiente possui aproximadamente dois anos de cultivo, sendo que antes do plantio foi realizada a prática de gradagem.

5.3 Coleta e preparação de amostras do solo

As coletas foram realizadas entre os meses de novembro e dezembro de 2022. Em cada sistema de uso foi determinado aleatoriamente 15 pontos amostrais, nestes pontos foram abertas trincheiras, nas profundidades de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm. Foram coletadas amostras de solo indeformadas as quais foram acondicionados em sacos plásticos. Foram quatro amostras por trincheira, totalizando 60 amostras por sistema de uso, ao final foram obtidas 240 amostras de solo levemente alteradas (torrões). Complementarmente, foram coletadas amostras indeformadas usando cilindros volumétricos, sendo 60 por sistema de uso, totalizando 240 amostras.

5.4 Análises físicas do solo

As análises do solo foram realizadas no Laboratório de Pedobiologia do Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente – IEAA, da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, em Humaitá, de acordo com as metodologias propostas por Teixeira et al. (2011). Os atributos físicos do solo analisados foram: densidade do solo

(DS), resistência do solo à penetração (RSP), porosidade total (PT), macroporosidade (Map), microporosidade (Mip), diâmetro médio geométrico (DMG), umidade volumétrica do solo (Uv), diâmetro médio ponderado (DMP), textura do solo (areia, silte e argila), e classe de agregados (>2 mm, [1-2] mm e <1 mm).

a) Análise granulométrica

A determinação dos componentes texturais foi realizada através do Método da Pipeta. Primeiramente, a suspensão do solo foi agitada lentamente por 16 horas em um aparelho agitador mecânico tipo Wagner, com a rotação ajustada para cerca de 50 rpm, após a adição de dispersante químico (NaOH 0,1 N). Durante esse tempo, o deslocamento vertical na suspensão foi fixado. Em seguida, foi pipetado um volume de 25 ml da suspensão para a determinação da argila. Essa amostra foi seca em estufa e depois pesada. A fração de areia foram separadas por peneiramento, também secas em estufa e pesadas para obter a suas respectivas frações em massa. Por fim, o silte foi obtido por diferença das outras frações em relação à amostra original de 20 gramas de solo utilizada (TEIXEIRA et al., 2017).

b) Densidade e porosidade do solo

A densidade do solo foi calculada pela relação entre a massa do solo seco em estufa a 105 °C e volume da amostra, segundo metodologia proposta pela Embrapa (TEIXEIRA et al., 2017). A porosidade foi calculada a partir da mesa de tensão segundo Embrapa (TEIXEIRA et al., 2017) e a microporosidade por diferença entre a porosidade total e a macroporosidade.

f) Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração (RSP) foi medida utilizando um penetrômetro eletrônico de bancada, com uma haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semiângulo de 30°, a uma velocidade constante de 0,0667 mm s⁻¹. O penetrômetro possui uma velocidade constante de 0,1667 mm/s e está equipado com uma célula de carga de 200 N, uma haste com um cone de base com diâmetro de 4 mm e um semi-ângulo de 30° (DALCHIAVON et al., 2011). As leituras foram registradas em um microcomputador através de um software próprio do equipamento.

c) Estabilidade de agregados

Os índices de estabilidade de agregados foram determinados seguindo o procedimento descrito por Kemper e Chepil (1965), onde as amostras de solo foram coletadas em diferentes profundidades 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm. e foram submetidas a um processo de peneiramento utilizando um agitador. Foram utilizados os agregados que passaram pela peneira de 9,52 mm e ficaram retidos na peneira de 4,76 mm. Posteriormente, os agregados foram secos ao ar e em seguida saturados por 10 minutos. Após a saturação, os agregados foram submetidos a um processo de peneiramento em água por 30 minutos, utilizando um conjunto de peneiras com diâmetros de 4,76 mm, 2,0 mm, 1,0 mm, 0,5 mm e 0,25 mm. Com base nesse processo de peneiramento, foram obtidas as seguintes classes de agregados: C1 (9,52-4,76 mm), C2 (4,76-2,0 mm), C3 (2,0-1,0 mm), C4 (1,0-0,5 mm), C5 (0,5-0,25 mm) e C6 (menor que 0,25 mm). Posteriormente em função das equações de diâmetro médio ponderado (DMP) proposto por Castro Filho et al. (1998) (Eq. 1). E diâmetro médio geométrico (DMG) proposto por Schaller e Stockinger (1953), citado por Alvarenga et al. (1986) (Eq. 2), foram determinados os valores dos diâmetros.

$$DMP = \frac{\sum_{t=1}^N niDi}{\sum ni}$$

(Eq.1)

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

$$DMP = 10^{\frac{\sum_{t=1}^N ni \log Di}{\sum ni}}$$

(Eq. 2).

Onde:

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

Di é o diâmetro médio de uma determinada peneira;

N é o número de classes de peneiras.

g) Matéria orgânica do solo

A matéria orgânica do solo foi determinada através do teor de carbono presente na amostra do solo. O carbono é um elemento essencial encontrado em compostos

orgânicos, como plantas, animais e microrganismos. A determinação da matéria orgânica no solo foi feita utilizando método Walkley-Black Adaptado por Yeomans e Bremmer com aquecimento externo, este método utiliza uma solução de dicromato de potássio em meio ácido para oxidar o carbono orgânico presente no solo. Após a oxidação, a amostra foi titulada com uma solução de sulfato ferroso para determinar a quantidade de carbono oxidada.

5.4 Análises estatística

As análises estatísticas foram realizadas no ambiente estatístico R versão 4.3.2 (R CORE TEAM, 2023) com auxílio dos pacotes *agricolae* (MENDIBURU, 2021) e *tydiverse* (WICKHAM et al., 2019). Os resultados foram analisados seguindo os protocolos de diagnóstico Zuur et al. (2010), assim verificamos os supostos de distribuição normal e homogeneidade das variâncias de resíduos de acordo aos testes de Shapiro-Wilk e teste de Bartlett ao 5% de significância ($P \geq 0,05$), respectivamente. Cumprindo esses pressupostos, foi realizada a Análise de Variância (ANOVA) e, quando significativos ($P < 0,05$), as médias dos tratamentos foram analisadas por meio do teste de Tukey ao 5% de nível de significância ($P < 0,05$).

6. RESULTADO

6.1 Sistemas de uso da terra sob os parâmetros físicos do solo

Na Figura 3 são apresentados os resultados da densidade do solo (DS), resistência à penetração (RSP) e porosidade total do solo (PT) dos sistemas de uso da terra entre suas diferentes camadas. De acordo com isso, para a camada do solo de 0-5 cm, constatou-se que o sistema de pastagem (DS = 1,50 g cm⁻³) aumenta significativamente em 26% a Ds do solo em comparação aos sistemas de floresta natural, sob cultivo de açaí e cultivo de mandioca em conjunto, estas últimas sem diferenças, entre si ($P \geq 0,05$). Para a camada do solo de 10-20 cm, o sistema de pastagem (DS = 1,32 g cm⁻³) mostrou uma densidade do solo 26% maior do que floresta natural. O sistema de cultivo de açaí diferiu significativamente da floresta natural em 15%. Na camada do solo de 20-40 cm o sistema de pastagem (DS = 1,55 g cm⁻³) foi diferente da floresta natural, apresentando um aumento de 26%. Por outro lado, a densidade do solo nos sistemas de cultivo de mandioca e açaí, quando

comparada à floresta natural, ambas apresentaram um aumento de 14% na densidade do solo.

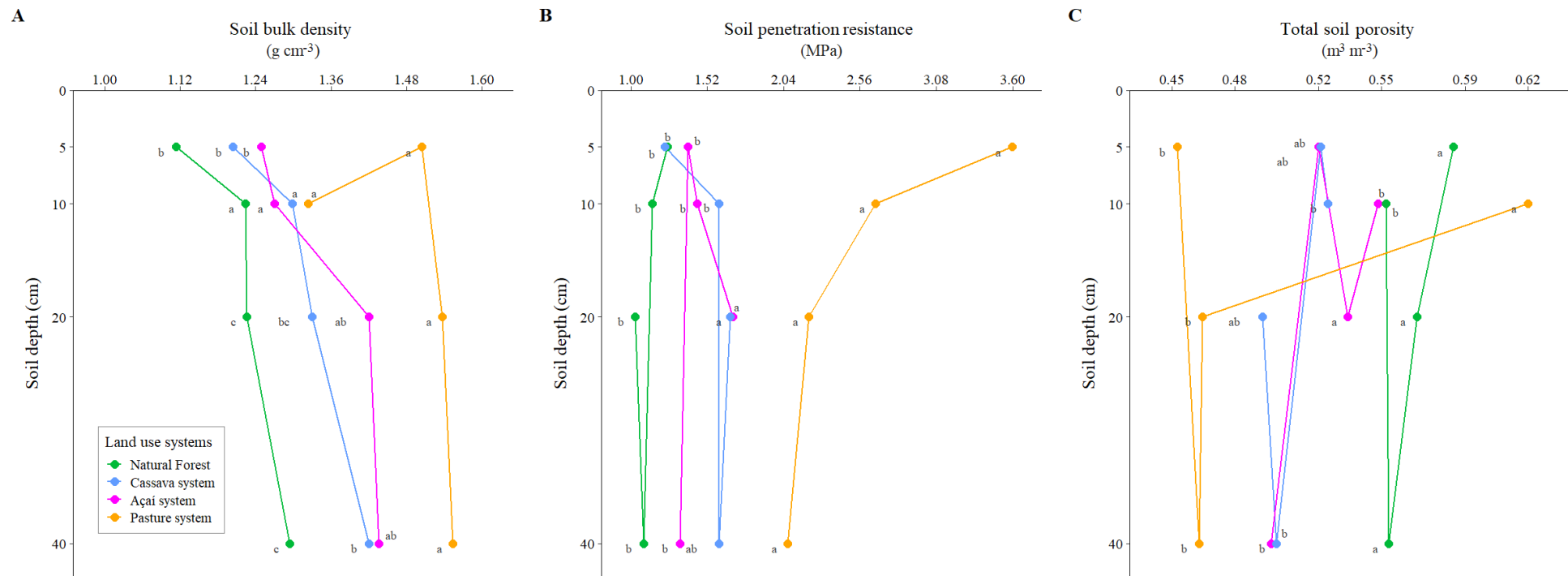


Figura 3. Avaliação da Densidade do solo (A), Resistência à penetração (B), Porosidade total (C) entre os sistemas de uso da terra. Letras diferentes indicam diferenças significativas de acordo com o teste de Tukey ao 5% ($P < 0,05$).

Para a PT (Fig. 3C), nas camadas do solo de 0-5 cm e 10-20 cm, os sistemas de cultivo sob açaí, mandioca e pastagem são semelhantes entre si ($P \geq 0,05$), mas somente o sistema de pastagem para 0-5 cm (PT = $0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e 10-20 cm (PT = $0,46 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), apresentam uma redução significativa de 7% e 8% com a floresta natural para 0-5 cm (PT = $0,58 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e 10-20 cm (PT = $0,57 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), respectivamente. No entanto, não foi observada diferença significativa entre a floresta natural e os sistemas de cultivo sob açaí e mandioca. De acordo com os resultados, os sistemas de cultivo sob pastagem, açaí e mandioca mostraram uma redução de 12% na porosidade do solo quando comparados com a Floresta natural, na camada de 20-40 cm do solo. Na camada de 5-10 cm, não foram encontradas diferenças significativas entre os sistemas floresta natural e as culturas de açaí e mandioca, bem como a pastagem.

Ao analisar os resultados de RSP (Fig. 3B), nas camadas do solo de 0-5 cm e 5-10 cm, observa-se uma sequência semelhante entre as camadas do solo dos diferentes sistemas de uso. Constatou-se que a RSP varia significativamente entre o sistema de pastagem para 0-5 cm (RSP = 3,60 Mpa) e 5-10 cm (RSP = 2,67 Mpa) e os sistemas de floresta natural para 0-5 cm (RSP = 1,25 Mpa) e 5-10 cm (RSP = 1,15 Mpa). Porém, não foram observadas diferenças estatísticas ($P \geq 0,05$) entre os sistemas de floresta natural, açaí e mandioca. De acordo com isso, o sistema de pastagem provoca um aumento de 179% na resistência à penetração do solo na camada do solo de 0-5 cm, e um aumento de 90% na camada do solo de 5-10 cm em comparação aos outros sistemas de uso avaliados.

Na camada do solo de 10-20 cm, os sistemas de cultivo de açaí (RSP = 1,69 Mpa), mandioca (RSP = 1,68 Mpa) e pastagem (RSP = 2,21 Mpa), em conjunto, diferiram de floresta natural (RSP = 1,03 Mpa), indicando um aumento de 83% na resistência do solo à penetração. Para esta variável, na camada do solo de 20-40 cm, observou-se que o sistema de pastagem (RSP = 2,07 Mpa) diferiu estatisticamente de floresta natural (RSP = 1,08 Mpa) e sistema de cultivo de açaí (RSP = 1,43 Mpa). No entanto, o sistema de floresta natural não diferiu estatisticamente ($P \geq 0,05$) dos sistemas sob cultivo de açaí e mandioca (RSP = 1,60 Mpa). Os resultados indicam que o sistema de pastagem aumenta a resistência do solo a penetração em 91% em relação a floresta natural.

Na Tabela 2 foram reportados os valores de microporosidade, umidade volumétrica e macroporosidade dos diferentes sistemas de uso entre suas diferentes

camadas. De acordo com isso, não foram observadas diferenças significativas ($P \geq 0,05$) na microporosidade (Mip) e umidade volumétrica (UV), entre os sistemas de uso nas camadas do solo de 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm nos diferentes sistemas de usos média para microporosidade (Mip = $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e umidade volumétrica (Uv = $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Entretanto, na camada solo de 20-40, o sistema de pastagem (Mip= $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; UV = $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) apresentou diferença significativa ($P < 0,05$) 5% menor em relação Floresta natural (Mip = $0,43 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e UV = $0,43 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), para ambas as variáveis.

Tabela 2. Umidade volumétrica, Macro e Microporosidade do solo sob quatro sistema de uso em diferentes profundidades na região sul do Amazonas.

Prof. (cm)	Sistema de uso	UV	Mip $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	Map
0-5	Floresta Natural	$0,41 \pm 0,01a$	$0,41 \pm 0,01a$	$0,17 \pm 0,01a$
	Açaizal	$0,36 \pm 0,02a$	$0,36 \pm 0,02a$	$0,16 \pm 0,02a$
	Mandiocal	$0,40 \pm 0,03a$	$0,40 \pm 0,03a$	$0,12 \pm 0,01ab$
	Pastagem	$0,35 \pm 0,03a$	$0,35 \pm 0,03a$	$0,11 \pm 0,01b$
5-10	Floresta Natural	$0,42 \pm 0,01a$	$0,42 \pm 0,01a$	$0,13 \pm 0,01a$
	Açaizal	$0,43 \pm 0,05a$	$0,43 \pm 0,05a$	$0,12 \pm 0,02ab$
	Mandiocal	$0,44 \pm 0,03a$	$0,44 \pm 0,03a$	$0,09 \pm 0,01b$
	Pastagem	$0,33 \pm 0,09a$	$0,33 \pm 0,09a$	$0,09 \pm 0,01b$
10-20	Floresta Natural	$0,43 \pm 0,01a$	$0,43 \pm 0,01a$	$0,14 \pm 0,01a$
	Açaizal	$0,44 \pm 0,03a$	$0,44 \pm 0,03a$	$0,10 \pm 0,01b$
	Mandiocal	$0,41 \pm 0,01a$	$0,41 \pm 0,01a$	$0,09 \pm 0,01b$
	Pastagem	$0,38 \pm 0,03a$	$0,38 \pm 0,03a$	$0,09 \pm 0,01b$
20-40	Floresta Natural	$0,43 \pm 0,01a$	$0,43 \pm 0,01a$	$0,13 \pm 0,01a$
	Açaizal	$0,40 \pm 0,02ab$	$0,40 \pm 0,02ab$	$0,10 \pm 0,01ab$
	Mandiocal	$0,41 \pm 0,01ab$	$0,41 \pm 0,01ab$	$0,09 \pm 0,01b$
	Pastagem	$0,38 \pm 0,01b$	$0,38 \pm 0,01b$	$0,08 \pm 0,01b$

Prof. = profundidade da camada; UV = umidade volumétrica; Mip = microporosidade; Map = macroporosidade. Letras diferentes significa diferenças significativas entre as camadas por sistema de uso de acordo com o teste de Tukey ao 5% de significância ($P < 0,05$). Média \pm SE, $n=15$.

Para a macroporosidade do solo, na profundidade do solo de 0-5 cm, observou-se que o sistema de pastagem apresentou uma média menor em 54% do que a Floresta Natural. No entanto, não foi identificada diferença estatisticamente significativa ($P \geq 0,05$) entre a Floresta Natural e os sistemas açai e mandiocal. Esses resultados indicam que o sistema de pastagem é responsável por uma redução de 6% da macroporosidade do solo em relação à Floresta Natural. Para profundidade

do solo de 5-10 cm, foi verificado que o sistema de mandiocal e pastagem apresentaram diferenças estatísticas ($P < 0,05$) em relação à Floresta Natural. No entanto, não houve diferença significativa entre a Floresta Natural e o sistema de açcaizal.

Isso indica que o sistema de pastagem e o sistema de mandiocal provocam uma diminuição de 3% na macroporosidade do solo quando comparadas com a Floresta Natural. Essa mesma relação também foi observada na profundidade do solo de 20-40 cm, onde percebeu-se que a macroporosidade do solo varia de forma significativa entre Floresta Natural e os sistemas de pastagem, açcaizal e mandiocal. Isso sugere que os sistemas de uso da terra reduziram a macroporosidade em 4% em comparação com a Floresta Natural. Desse modo, com os resultados apresentados na Tabela 2 e Figura 3, em geral, verificamos que nem todos os sistemas de uso do solo dos perfis avaliados, são afetados pelo sistema de uso da terra na densidade do solo (DS), macroporosidade (Map), porosidade total (PT) e resistência do solo a penetração (RSP).

Na Figura 4 são apresentados os resultados da granulometria dos diferentes sistemas de uso da terra em suas diferentes profundidades. Para o teor de argila (Fig. 4A), constatou-se que o sistema de mandiocal apresentou menor teor de argila (Argila = $222,70 \text{ g kg}^{-1}$) em comparação com os sistemas de açcaizal, Floresta Natural e sistema de pastagem variando de $271,90 \text{ g kg}^{-1}$, $283,39 \text{ g kg}^{-1}$ e $305,73 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente, sem diferenças entre si. Esses resultados foram observados também nas profundidades 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm.

Para a profundidades do solo de 0-5 cm, o sistema de mandiocal teve uma concentração de argila 28% menor do que a Floresta Natural, sistema de pastagem e açcaizal, em conjunto. Na camada de solo compreendida entre 5-10 cm, o sistema de mandiocal apresentou uma redução no teor de areia em 32% nos valores observados. Já na camada de solo entre 10-20 cm, o sistema de mandiocal apresentou uma concentração de areia 29% menor em comparação com a área de referência Floresta Natural. Por fim, na camada de solo entre 20-40 cm, o sistema de mandiocal mostrou uma menor concentração de areia em até 31%.

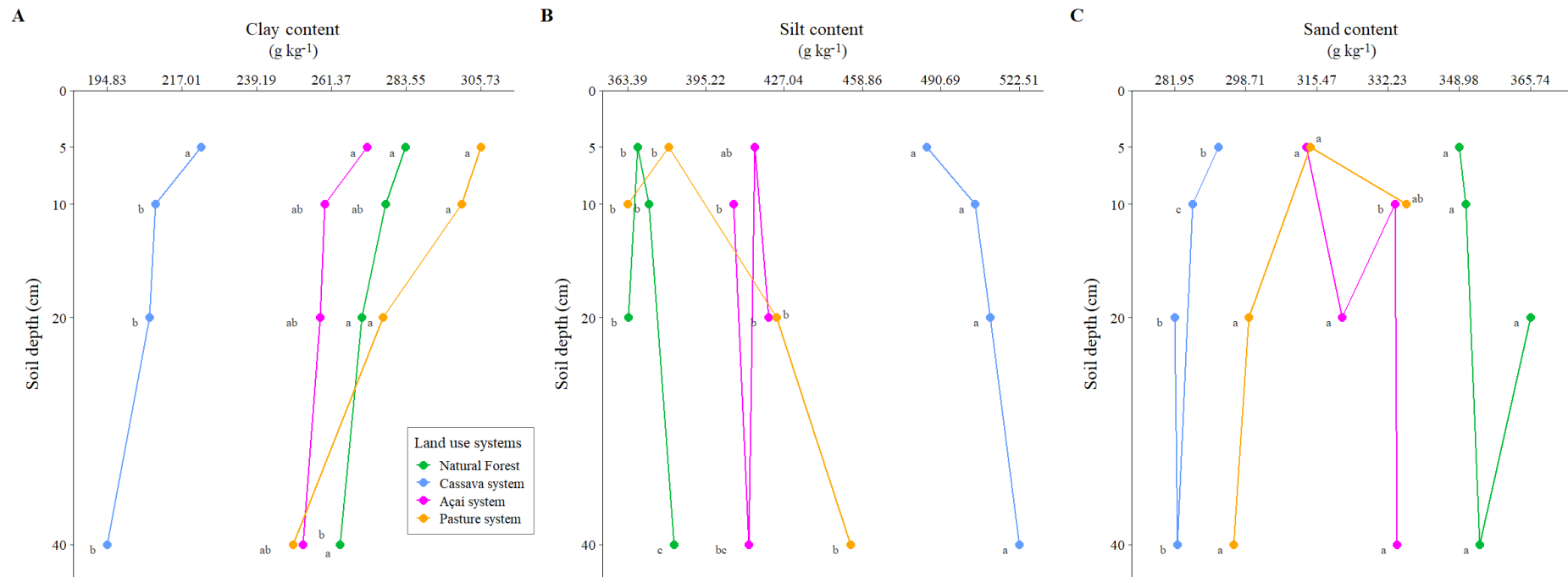


Figura 4. Frações granulométricas do solo argila, silte e areia.

No teor de silte (Fig. 4B), observou-se que o sistema de mandiocal apresentou maior teor em relação aos sistemas de Floresta Natural, sistema de pastagem e sistema de açaiçal, em conjunto, sem diferenças entre si ($P \geq 0,05$). Este mesmo resultado foi observado nas profundidades 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm. Para a profundidades 0-5 cm, o sistema de mandiocal teve uma concentração de silte 32% maior do que a Floresta Natural. Para a camada de 5-10 cm, a concentração foi 35% maior. Na profundidade de 10-20 cm, sistema de mandiocal a concentração foi 40% maior. Na profundidade de 20-40 cm, o sistema de mandiocal apresentou uma concentração de silte 36% maior.

Para a variável areia não houve diferenças nos teores de areia (Fig. 4C) na profundidade de 0-5 cm entre os sistemas de mandiocal (areia = 292,27 g kg⁻¹), sistemas de açaiçal (areia = 313,01 g kg⁻¹), sistemas de pastagem (argila= 313,96 g kg⁻¹) e Floresta Natural (areia = 349,04 g kg⁻¹). No entanto, nas profundidades de 5-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm, a Floresta Natural com 350,5 g kg⁻¹ para 5-10 cm, 365,74 g kg⁻¹ para 10-20 cm e 353,86 g kg⁻¹ para 20-40 cm e sistema de açaiçal 333,94 g kg⁻¹ para 5-10 cm, 321,43 g kg⁻¹ para 10-20 cm e 334,37 g kg⁻¹ para 20-40 cm, respectivamente, apresentaram os maiores valores de areia em comparação, tanto o sistema de mandiocal quanto o sistema de pastagem, apresentaram teores inferiores de areia nessas camadas.

Na Figura 5 são apresentados os diâmetros médios ponderados (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e matéria orgânica do solo (MOS) dos diferentes sistemas de uso da terra entre suas diferentes profundidades. Ao analisar os níveis de matéria orgânica do solo (Fig. 5A), foi observado que a área de Floresta Natural apresentou os maiores teores de MOS nas profundidades de 0-5 cm. No entanto, não houve diferença ($P \geq 0,05$) em relação ao sistema de pastagem.

Na profundidade do solo de 5-10 cm, os sistemas de pastagem, açaiçal e mandiocal apresentaram redução de 68%. Na profundidade do solo de 10-20 cm, a Floresta Natural diferiu ($P < 0,05$) do sistema de açaiçal em 64%, mas não houve diferença ($P \geq 0,05$) em relação ao sistema de pastagem e ao sistema de mandiocal. Na profundidade do solo de 20-40 cm, a Floresta Natural ($P < 0,05$) diferiu do sistema de pastagem e do sistema de açaiçal em 63%, mas não houve diferença em relação ao sistema de mandiocal.

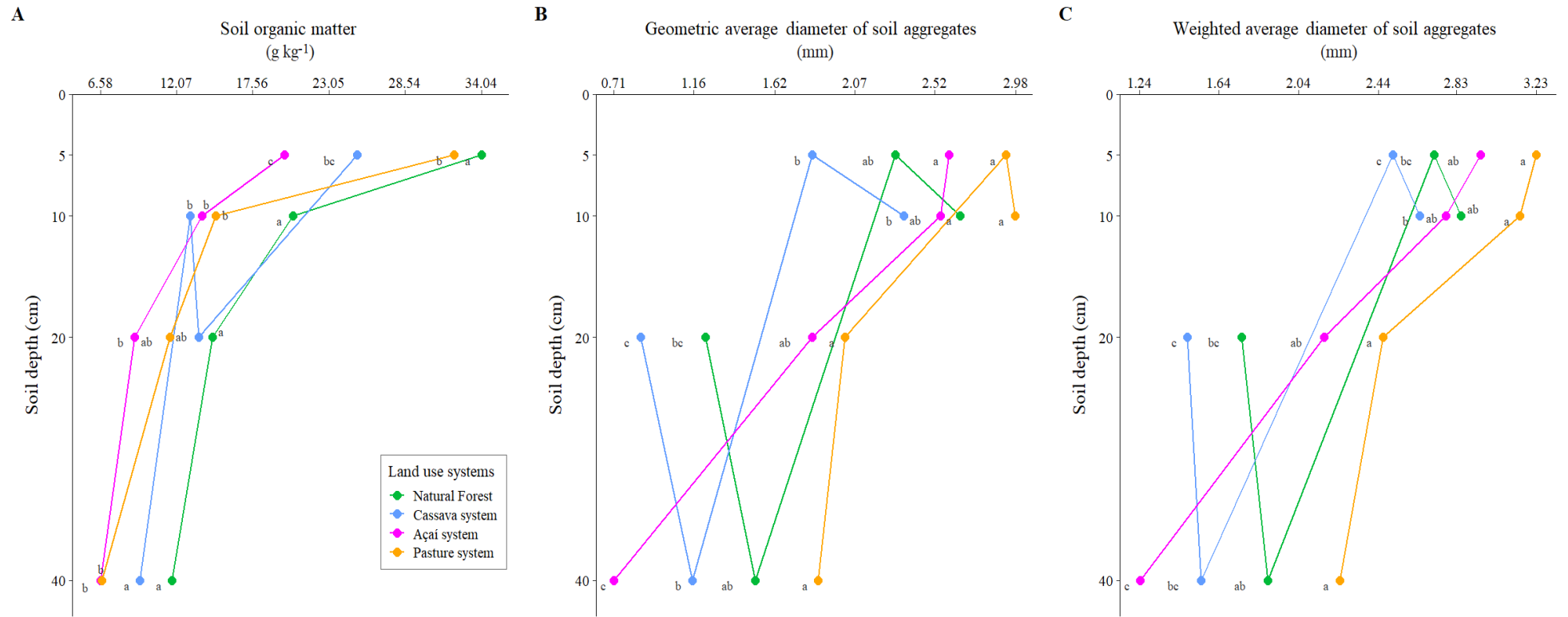


Figura 5. Matéria orgânica de solo (MOS), diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP).

O sistema de pastagem apresentou DMG (Fig. 5B) significativamente maior em comparação com a Floresta Natural na profundidade do solo de 10-20 cm, com um aumento de 64%. Para as demais profundidades do solo, logo não se observaram diferenças entre o sistema de pastagem e a Floresta Natural. Na profundidade do solo 5-10 cm, a Floresta Natural apresentou uma diferença de 4% e 14% em relação ao sistema de açazal e sistema de mandiocal, respectivamente.

Já na profundidade do solo de 20-40 cm, a diferença foi de 12% em relação ao sistema de açazal e 30% em relação ao sistema de mandiocal. Nas demais profundidades avaliadas, não houve diferença estatisticamente significativa entre os sistemas de uso ($P \geq 0,05$). O DMP (Fig. 5C), nas profundidades do solo de 0-5 cm e de 10-20 cm, foi significativamente maior em 18% e 40% no sistema de pastagem em comparação com o sistema de Floresta Natural. Logo, não se observaram diferenças significativas entre os sistemas de Floresta Natural, sistema de açazal e sistema de mandiocal, em conjunto.

Na Tabela 3 são reportados os valores das frações de agregados do solo dos diferentes sistemas de uso da terra entre as suas diferentes profundidades. De acordo com isso, os resultados para as frações de agregados $> 2\text{mm}$, a percentagem foi significativamente 20% maior no solo sob pastagem do que na Floresta Natural e sistemas de mandiocal. Sem diferir do sistema de açazal ($P \geq 0,05$) em superfície 0-5 cm, para profundidade 5-10 cm somente mandiocal diferiu de floresta natural ($P < 0,05$), para a profundidade 10-20 cm, o sistema de pastagem foi 60% maior, porém não diferiu da Floresta Natural em 20-40 cm ($P \geq 0,05$).

Tabela 3. Classe de agregados do solo sob quatro sistema de uso em diferentes profundidades na região sul do Amazonas

Prof.	Sistema de uso	>2 mm	[1-2] mm	<1 mm
		%		
0-5	Floresta Natural	83,44 ± 5,03bc	5,05 ± 0,87a	11,51 ± 2,27ab
	Açaizal	86,33 ± 1,81ab	5,34 ± 0,56a	8,34 ± 0,99bc
	Mandiocal	73,14 ± 4,95c	8,07 ± 1,42a	18,79 ± 2,71a
	Pastagem	95,95 ± 0,43a	0,62 ± 0,07b	3,43 ± 0,37c
5-10	Floresta Natural	81,63 ± 4,74ab	8,13 ± 1,16ab	10,23 ± 1,74ab
	Açaizal	76,94 ± 4,22bc	11,11 ± 1,50a	11,94 ± 1,06ab
	Mandiocal	73,95 ± 4,76c	11,14 ± 1,22a	15,01 ± 1,41a
	Pastagem	90,77 ± 2,58a	3,40 ± 0,73b	5,83 ± 0,65b
10-20	Floresta Natural	50,19 ± 6,02bc	20,66 ± 1,57a	29,15 ± 2,56b
	Açaizal	62,67 ± 5,07ab	16,15 ± 0,93ab	21,19 ± 2,07bc
	Mandiocal	42,06 ± 3,81c	18,71 ± 0,76ab	39,24 ± 3,16a
	Pastagem	71,41 ± 4,89a	11,99 ± 1,12b	16,61 ± 2,14c
20-40	Floresta Natural	52,48 ± 5,73ab	22,99 ± 2,15a	24,53 ± 1,84bc
	Açaizal	32,50 ± 3,37c	17,91 ± 0,81a	49,58 ± 4,01a
	Mandiocal	42,24 ± 3,75bc	24,66 ± 1,51a	33,10 ± 1,72b
	Pastagem	63,94 ± 4,46a	16,46 ± 1,72a	19,60 ± 1,59c

Prof. = profundidade da camada; >2mm = tamanhos de agregados maior que 2mm; [1-2]mm = tamanhos de agregados entre 1 e 2 mm; <1mm = tamanhos de agregados menor que 1mm. Letras diferentes significa diferenças significativas entre as camadas por sistema de uso de acordo com o teste de Tukey ao 5% de significância ($P < 0.05$). Média ± SE, $n = 15$.

As frações de agregados > 2mm, foram significativamente 20% maior no sistema de pastagem do que na Floresta Natural e sistema de mandiocal, sem diferir do sistema de açai em superfície 0-5 cm, para profundidade 5-10 cm somente mandiocal diferiu de Floresta Natural, para a profundidade 10-20 cm, o sistema de pastagem foi 60% maior, porém não diferiu da Floresta Natural em 20-40 cm ($P \geq 0,05$). Na classe de agregados de tamanho < 1,0 mm, em superfície foi observada maior porcentagem de agregados no solo sob cultivo de mandioca e Floresta Natural, enquanto a menor porcentagem foi encontrada no solo sob pastagem, sendo 57% menor em comparação com a Floresta Natural. Para esta variável, na profundidade de 5-10 cm, não houve diferenças significativas entre os diferentes sistemas agrícolas e a Floresta Natural, mas na profundidade de 10-20 cm, uma maior porcentagem de agregados foi encontrada no solo sob cultivo de mandioca, sendo 43% maior em relação à Floresta Natural. Por outro lado, um menor percentual foi observado no sistema de pastagem, sendo 73% menor em comparação com a Floresta Natural.

6.2 Correlação de Pearson

Na Tabela 4, os coeficientes de correlação de Pearson dos indicadores físicos do solo no sistema de açai no sul do Amazonas foram registrados. Uma correlação significativa de 73% foi observada entre a densidade (DS) e a macroporosidade (Map), indicando uma correlação negativa alta ($r = -0,73$, $P < 0,05$). Além disso, a DS demonstrou correlações moderadas com >2mm, [1-2]mm, <1mm, diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP) e matéria orgânica (MOS) ($P < 0,05$). Foram observadas correlações altas de 86% entre silte e areia, 59% entre silte e argila, e 60% entre resistência do solo à penetração e macroporosidade ($P < 0,05$). A macroporosidade apresentou uma correlação alta ($P < 0,05$) com >2mm, [1-2]mm, <1mm, diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP) e matéria orgânica (MOS) ($P < 0,05$), enquanto foi observada uma correlação de 93% entre DMP e DMG ($r = 0,93$, $P < 0,05$), e 71% entre MOS e DMP ($r = 0,71$, $P < 0,05$) e uma correlação positiva forte entre PT e UV ($r = 0,87$, $P < 0,05$)

A Tabela 5 apresenta os coeficientes de correlação de Pearson dos indicadores físicos do solo na Floresta Natural no sul do Amazonas. Observou-se uma correlação de 68% entre a macroporosidade (Map) e a densidade do solo (DS), indicando uma

correlação negativa alta ($r = -0,68, P < 0,05$). Além disso, a Ds também apresentou uma correlação negativa moderada de 35% com PT ($r = -0,35, P < 0,05$). E correlações moderadas positivas de 44% com UV e Mip ($r = 0,44, P < 0,05$). Por outro lado, PT e Map demonstraram uma correlação positiva moderada de 68% ($r = 0,68, P < 0,05$). Foram identificadas correlações fortes: entre DMP e MOS com uma correlação positiva de 62% ($r = 0,62, P < 0,05$), e entre DMG e DMP com uma correlação positiva forte de 87% ($r = 0,87, P < 0,05$).

A Tabela 6 exibe os coeficientes de correlação de Pearson entre os indicadores físicos do solo no sistema de mandioca no sul da Amazônia. Observou-se uma correlação forte e positiva de 84% entre porosidade total (PT) e umidade volumétrica (UV) ($r = 0,84, P < 0,05$), enquanto Pt apresentou uma correlação moderada e negativa de 45% com a densidade (DS) ($r = -0,45, P < 0,05$). A DS mostrou uma correlação de 64% com a matéria orgânica, indicando uma correlação alta e negativa com esse componente do solo ($r = -0,64, P < 0,05$). Além disso, a microporosidade apresentou uma correlação muito alta e positiva de 84% com PT ($r = 0,84, P < 0,05$). Os agregados >2mm demonstraram uma correlação forte e positiva, alcançando 95% com o diâmetro médio ponderado (DMP) ($r = 0,95, P < 0,05$), e 72% com o diâmetro médio geométrico (DMG) ($r = 0,72, P < 0,05$) e uma correlação positiva forte entre PT e UV ($r = 0,84, P < 0,05$). Esses resultados refletem as relações entre os indicadores físicos do solo no contexto específico do cultivo de mandioca na região sul da Amazônia.

A Tabela 7 exibe os coeficientes de correlação de Pearson entre diversos indicadores físicos do solo em um sistema de pastagem no sul da região Amazônica. Foi observada uma correlação positiva expressiva de 89% entre DMP e DMG ($r = 0,89, P < 0,05$). Os coeficientes de correlação entre DS e UV, PT, e Mip são todos negativos, aproximadamente 49% ($r = -0,49, P < 0,05$), indicando uma correlação moderadamente forte e negativa entre esses indicadores. Além disso, foi notada uma correlação moderada positiva em torno de 42% entre argila e UV, PT e Mip ($r = 0,42, P < 0,05$). O DMG) apresentou uma correlação alta com DMP, atingindo 89% ($r = 0,89, P < 0,05$), e uma correlação moderada com matéria orgânica do solo, aproximadamente 40% ($r = 0,40, P < 0,05$). Já o DMP teve uma correlação moderada de 50% com a matéria orgânica do solo ($r = 0,50, P < 0,05$) e e uma correlação positiva forte entre PT e UV ($r = 0,99, P < 0,05$). Estes resultados delineiam as relações entre

os indicadores físicos do solo no contexto específico do sistema de pastagem na região sul da Amazônia.

Tabela 4. Coeficientes de correlação de Pearson dos indicadores físicos do solo em sistemas de açaizal no sul da Amazonas.

	Ds	Uv	PT	Mip	Map	Areia	Argila	Silte	RSP	>2 mm	[1-2]mm	<1mm	DMG	DMP	MOS
Ds	1														
Uv	0.14	1													
PT	-0.23	0.87***	1												
Mip	0.14	1.00***	0.87***	1											
Map	-0.73***	-0.29*	0.21	-0.29*	1										
Areia	-0.28*	-0.23	-0.13	-0.23	0.19	1									
Argila	0.05	-0.15	-0.13	-0.15	0.06	0.09	1								
Silte	0.20	0.26*	0.17	0.26*	-0.19	-0.86***	-0.59***	1							
RSP	0.38**	0.16	-0.14	0.16	-0.60***	-0.16	0.10	0.08	1						
>2mm	-0.52***	-0.12	0.11	-0.12	0.46***	-0.16	0.15	0.05	-0.03	1					
[1-2]mm	0.52***	0.15	-0.08	0.15	-0.46***	0.12	-0.03	-0.08	0.26*	-0.62***	1				
<1mm	0.42***	0.09	-0.10	0.09	-0.37**	0.06	-0.19	0.05	-0.04	-0.94***	0.35**	1			
DMG	-0.51***	-0.16	0.05	-0.16	0.42***	0.02	0.17	-0.10	-0.11	0.78***	-0.41**	-0.77***	1		
DMP	-0.54***	-0.15	0.08	-0.15	0.46***	-0.05	0.24	-0.08	-0.09	0.92***	-0.50***	-0.90***	0.93***	1	
MOS	-0.57***	-0.25	0.07	-0.25	0.63***	-0.02	0.21	-0.09	-0.24	0.76***	-0.64***	-0.65***	0.60***	0.71***	1

Ds= densidade do solo; Uv = umidade volumétrica; PT = porosidade total do solo; Map = microporosidade do solo; Mip = microporosidade do solo; Areia = teor de areia; Argila = teor de argila; Silte= teor de silte; RSP= resistência do solo a penetração; >2mm = tamanhos de agregado maiores que 2 mm; [1-2]mm= tamanhos de agregados entre 1 e 2 mm; <1mm= tamanhos de agregados menores que 1 mm; DMP = diâmetro médio ponderado; DMG = diâmetro médio geométrico; MOS = matéria orgânica do solo. *** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, e * $P < 0.05$.

Tabela 5. Coeficientes de correlação de Pearson dos indicadores físicos do solo em Floresta Natural no sul da Amazonas.

	Ds	Uv	PT	Mip	Map	Areia	Argila	Silte	RSP	>2 mm	[1-2]mm	<1mm	DMG	DMP	MOS
Ds	1														
Uv	0.44***	1													
PT	-0.35**	0.36**	1												
Mip	0.44***	1.00***	0.36**	1											
Map	-0.68***	-0.44***	0.68***	-0.44***	1										
Areia	0.00	-0.12	-0.05	-0.12	0.05	1									
Argila	-0.30*	-0.33*	-0.01	-0.33*	0.25	-0.10	1								
Silte	0.18	0.30*	0.05	0.30*	-0.19	-0.80***	-0.52***	1							
Rsp	-0.02	0.09	-0.14	0.09	-0.20	0.00	-0.11	0.06	1						
>2mm	-0.46***	-0.29*	0.29*	-0.29*	0.51***	0.01	0.09	-0.06	0.03	1					
[1-2]mm	0.45***	0.23	-0.31*	0.23	-0.48***	0.03	-0.17	0.08	-0.03	-0.90***	1				
<1mm	0.38**	0.32*	-0.23	0.32*	-0.47***	-0.02	0.01	0.01	0.02	-0.94***	0.72***	1			
DMG	-0.30*	-0.26*	0.14	-0.26*	0.34**	0.12	0.05	-0.14	0.08	0.76***	-0.65***	-0.77***	1		
DMP	-0.39**	-0.27*	0.22	-0.27*	0.43***	0.04	0.07	-0.07	0.03	0.93***	-0.82***	-0.88***	0.87***	1	
MOS	-0.42***	-0.15	0.35**	-0.15	0.46***	-0.01	0.17	-0.09	0.14	0.72***	-0.75***	-0.61***	0.47***	0.62***	1

Ds= densidade do solo; Uv = umidade volumétrica; PT = porosidade total do solo; Map = microporosidade do solo; Mip = microporosidade do solo; Areia = teor de areia; Argila = teor de argila; Silte= teor de silte; RSP= resistência do solo a penetração; >2mm = tamanhos de agregado maiores que 2 mm; [1-2]mm= tamanhos de agregados entre 1 e 2 mm; <1mm= tamanhos de agregados menores que 1 mm; DMP = diâmetro médio ponderado; DMG = diâmetro médio geométrico; MOS = matéria orgânica do solo. *** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, e * $P < 0.05$.

Tabela 6. Coeficientes de correlação de Pearson dos indicadores físicos do solo no sistema de mandiocal no sul da Amazonas

	Ds	Uv	PT	Mip	Map	Areia	Argila	Silte	RSP	>2 mm	[1-2]mm	<1mm	DMG	DMP	MOS
Ds	1														
Uv	-0.13	1													
PT	-0.45***	0.84***	1												
Mip	-0.13	1.00***	0.84***	1											
Map	-0.51***	-0.46***	0.09	-0.46***	1										
Areia	-0.10	0.09	0.10	0.09	0.00	1									
Argila	-0.16	-0.11	0.04	-0.11	0.27*	-0.29*	1								
Silte	0.19	-0.03	-0.12	-0.03	-0.14	-0.86***	-0.24	1							
RSP	0.28*	0.36**	0.08	0.36**	-0.53***	-0.21	-0.11	0.27*	1						
>2mm	-0.33*	-0.08	0.06	-0.08	0.25	0.20	-0.03	-0.18	-0.31*	1					
[1-2]mm	0.48***	0.10	-0.11	0.10	-0.35**	-0.10	-0.20	0.21	0.16	-0.79***	1				
<1mm	0.11	0.01	-0.05	0.01	-0.09	-0.19	0.17	0.10	0.28*	-0.89***	0.46***	1			
DMG	-0.16	-0.04	0.02	-0.04	0.10	0.16	0.00	-0.16	-0.22	0.72***	-0.46***	-0.74***	1		
DMP	-0.29*	-0.09	0.04	-0.09	0.22	0.19	0.00	-0.19	-0.32*	0.95***	-0.70***	-0.89***	0.89***	1	
MOS	-0.64***	0.04	0.26*	0.04	0.36**	-0.04	0.27*	-0.10	-0.26*	0.33**	-0.42***	-0.14	0.17	0.30*	1

Ds= densidade do solo; Uv = umidade volumétrica; PT = porosidade total do solo; Map = microporosidade do solo; Mip = microporosidade do solo; Areia = teor de areia; Argila = teor de argila; Silte= teor de silte; RSP= resistência do solo a penetração; >2mm = tamanhos de agregado maiores que 2 mm; [1-2]mm= tamanhos de agregados entre 1 e 2 mm; <1mm= tamanhos de agregados menores que 1 mm; DMP = diâmetro médio ponderado; DMG = diâmetro médio geométrico; MOS = matéria orgânica do solo. *** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, e * $P < 0.05$.

Tabela 7. Coeficientes de correlação de Pearson dos indicadores físicos do solo no sistema de pastagem no sul da Amazonas.

	Ds	Uv	PT	Mip	Map	Areia	Argila	Silte	RSP	>2 mm	[1-2]mm	<1mm	DMG	DMP	MOS
Ds	1														
Uv	-0.49***	1													
PT	-0.49***	0.99***	1												
Mip	-0.49***	1.00***	0.99***	1											
Map	0.00	-0.07	0.08	-0.07	1										
Areia	-0.33**	-0.06	-0.10	-0.06	-0.22	1									
Argila	-0.17	0.42***	0.42***	0.42***	0.02	0.06	1								
Silte	0.36**	-0.19	-0.17	-0.19	0.16	-0.82***	-0.63***	1							
RSP	0.11	-0.08	-0.08	-0.08	0.03	-0.05	0.27*	-0.12	1						
>2mm	-0.16	0.08	0.12	0.08	0.30*	0.18	0.51***	-0.44***	0.36**	1					
[1-2]mm	0.14	-0.08	-0.12	-0.08	-0.30*	-0.19	-0.48***	0.43***	-0.35**	-0.96***	1				
<1mm	0.16	-0.07	-0.11	-0.07	-0.26*	-0.2	-0.50***	0.45***	-0.37**	-0.98***	0.90***	1			
DMG	-0.20	0.06	0.08	0.06	0.13	0.25	0.45***	-0.46***	0.20	0.65***	-0.60***	-0.65***	1		
DMP	-0.22	0.08	0.10	0.08	0.16	0.23	0.52***	-0.48***	0.30*	0.82***	-0.76***	-0.80***	0.89***	1	
MOS	-0.12	-0.09	-0.04	-0.09	0.32*	0.16	0.36**	-0.34**	0.45***	0.54***	-0.56***	-0.51***	0.40***	0.50***	1

Ds= densidade do solo; Uv = umidade volumétrica; PT = porosidade total do solo; Map = microporosidade do solo; Mip = microporosidade do solo; Areia = teor de areia; Argila = teor de argila; Silte= teor de silte; RSP= resistência do solo a penetração; >2mm = tamanhos de agregado maiores que 2 mm; [1-2]mm= tamanhos de agregados entre 1 e 2 mm; <1mm= tamanhos de agregados menores que 1 mm; DMP = diâmetro médio ponderado; DMG = diâmetro médio geométrico; MOS = matéria orgânica do solo. *** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, e * $P < 0.05$.

6.3 Análises de componentes principais

A análise fatorial para componentes principais (Fig. 4) revelam que entre o 68 e 89% da variância pode ser explicada pelos atributos físicos do solo nos quatro sistemas de uso da terra. De forma holística (Fig. 4A), observa-se dois grupos de sistemas de uso da terra, um grupo associado, à direita, ao aumento do teor de areia, teor de silte, matéria orgânica do solo, porosidade total, microporosidade, umidade volumétrica com a Floresta Natural e sistema de mandiocal. Logo, à esquerda verifica-se um grupo associado ao aumento do teor de argila, diâmetro médio ponderado e diâmetro médio geométrico, resistência à penetração, densidade do solo, principalmente, para o sistema de pastagem e em menor medida com o sistema de açaiçal.

Por outro lado, quando analisados os sistemas de uso da terra em função das profundidades do solo (Fig. 4B) percebemos que a primeira dimensão, à direita as agrupa em profundidades do solo de 0-5 cm e 5-10 cm associadas com o aumento da umidade gravimétrica, umidade volumétrica, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, teor de areia, teor de argila, resistência à penetração do solo, tamanho de agregados maior a 2 mm, diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico e matéria orgânica do solo. À esquerda, as profundidades de 10-20 cm e 20-40 cm relacionam-se com a densidade do solo, teor de silte e o tamanho dos agregados entre 1 e 2 mm e menor que 1 mm.

Entre os destaques mais importantes relacionados aos sistemas de uso da terra (Fig. 4A), observa-se que a Floresta Natural apresenta maior relação com a umidade volumétrica, teor de areia, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo. O sistema de mandiocal mostrou uma relação direta com o aumento do teor de silte, tamanho de agregados entre 1 e 2 mm e menor que 1 mm. O sistema de pastagem foi caracterizado, principalmente, pelo aumento da densidade do solo, resistência à penetração, teor de argila, diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico e tamanho de partículas maior a 2 mm. Por fim, no sistema de açaiçal foi possível observar que na medida que as profundidade do solo vai aumentando (Fig. 4B) a sua relação vai se reduzindo com o teor de matéria orgânica do solo e teor de

argila, mas em aumento do teor de silte e tamanho de agregados entre 1 e 2 mm e menor a 1 mm.

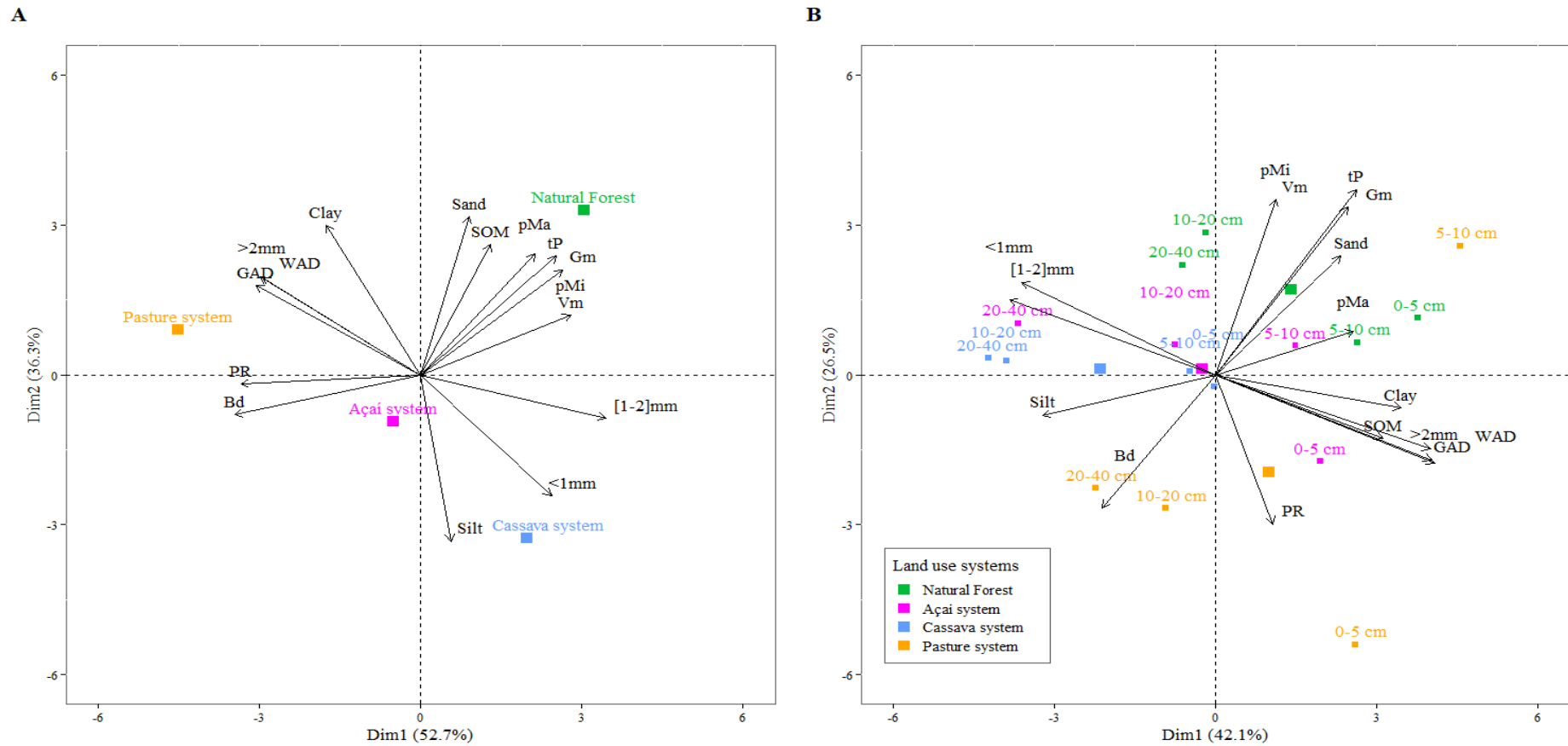


Fig. 4 Análise de componentes principais dos índices de qualidade do solo. (A) Visão holística e (B) Sistemas de uso da terra por profundidade de solo. Bd= densidade do solo; Vm = umidade volumétrica; tP = porosidade total do solo; pMa = microporosidade do solo; pMi = microporosidade do solo; sand = teor de areia; clay = teor de argila; Silt = teor de lodo; PR= resistência do solo; >2mm = tamanhos de agregado maiores que 2 mm; [1-2]mm= tamanhos de agregados entre 1 e 2 mm; <1mm= tamanhos de agregados menores que 1 mm; WAD = diâmetro médio ponderado; GAD = diâmetro médio geométrico; SOM = matéria orgânica do solo.

7. DISCUSSÃO

Como observado no presente estudo, a qualidade do solo variam significativamente entre os sistemas de usos da terra (Tabelas 1 e 2 e Figuras 1, 2 e 3) indicando que as alteração deles afeta diretamente as propriedades física do solo, como a resistência do solo a penetração, densidade do solo, agregação do solo e porosidade, mas não houve limitações quanto aos valores críticos estabelecidos na literatura (COSTA et al. 2011; ORTIGARA et al. 2014).

A porosidade total (PT) e a densidade do solo (DS) são amplamente utilizadas como indicadores da qualidade do solo. Mascarenhas et al. (2017) e Campos et al. (2015) mostraram a importância delas na avaliação da qualidade do solo uma vez que são características sensíveis às alterações do uso do solo além de serem relativamente de fácil determinação. A PT do solo está relacionada à compactação do solo, sendo que um solo mais compactado apresenta menor porosidade. Por outro lado, a DS está associada à restrição do crescimento das raízes das plantas (PACHECO et al., 2015). Desse modo, observamos que a DS tende a aumentar juntamente com a resistência à penetração do solo, o que indica uma maior compactação do solo (MENTGES et al., 2010). No entanto não foram observado correlação neste sistema entres (DS) e (PT) (tabela 5).

O valor máximo registrado da densidade do solo nos sistemas de uso do solo foi de $1,5 \text{ kg m}^{-3}$, valor este registrado na profundidade de 0-5 cm no sistema de pastagem. A compactação do solo, assim como observado na resistência do solo a penetração (RSP), em sistema de pastagens é, geralmente, ocasionada pelo trânsito de animais, visto que a força exercida na superfície elimina a macroporosidade e induz ao aumento da Ds (KUNZ et al., 2013). O estudo realizado por Freitas et al. (2012), sobre a RSP submetido a diferentes formas de manejo encontrou resultados similares, com uma maior densidade do solo observada em áreas de pastagens, e menor encontrada em área de Floresta Natural. Por outro lado, de acordo com Pires et al. (2011), o aporte de matéria orgânica pode diminuir os valores de DS com o tempo. A qual se assemelha a este estudo, Floresta Natural com menor DS e maior aporte de matéria orgânica em 34,04%.

Estudos realizados por Cunha et al. (2011) e Marcolin e Klein (2011) indicam que a matéria orgânica do solo contribui para a diminuição dos valores de densidade

do solo, observou-se correlação negativa forte no sistema de açaizal e sistema de mandiocal o sistema de pastagem não apresentou correlação forte. Além disso, Pezzoni et al. (2012) demonstraram uma correlação significativa entre a quantidade de matéria orgânica proveniente da serrapilheira e baixos valores de densidade do solo. Para a porosidade total (PT, Fig. 3C), verificamos uma redução da porosidade do solo no sistema de pastagem, com o menor valor observado na profundidade de 0-5 cm (PT = 0,45 m³ m⁻³), que confirma a compactação em superfície. Essa constatação está em consonância com um estudo conduzido por (LIMA et al., 2021) verificaram que a maior porosidade total do solo, em floresta natural, o que está de acordo com outros estudos realizados na região amazônica (ARAUJO et al., 2022; LIMA et al., 2021).

Os valores de PT em sistema de pastagem são inferiores a 0,50 m³ m⁻³ mais estão acima de 0,10 m³ m⁻³ de macroporosidade que são considerados valores ótimos para o desenvolvimento das plantas (0,1 e 0,15 m³ m⁻³). Logo, os demais sistemas de açaizal, mandiocal e Floresta Natural os valores são superiores a 0,50 m³ m⁻³. No entanto, ao se tratar de um valor inerente do solo ocorrente nesses sistemas e das plantas cultivadas (e/ou biodiversidade), a junção de outras propriedades podem permitir o crescimento adequado das plantas, mesmo em valores superiores aos recomendados.

Assim, os resultados encontrados neste estudo são condizentes com aqueles encontrados por Araujo et al. (2022), quando avaliaram os impactos na variabilidade espacial da densidade e porosidade do solo em função da transformação de floresta natural em sistema de pastagem no Vale do Jamari, Rondônia.

Sabe-se que resistência do solo à penetração (RSP) é um parâmetro utilizado para indicar o grau de compactação do solo (MION et al., 2012). Assim, trata-se de um indicador da qualidade física do solo, uma vez que permite medir o nível de compactação e mensurar a erosão do solo (BERGAMIN et al., 2010; CAVALCANTE et al., 2011). Observou-se que o sistema de pastagem apresenta maiores valores de RSP na profundidade do solo de 0- 5 cm e 5-10 cm, quando comparados aos demais sistemas de uso da terra. Ademais, a RSP foi maior na pastagem do que na floresta natural em todas as camadas.

Resultados semelhantes foram encontrados em outros estudos realizados na região da Amazônia brasileira. De acordo com Campos et al. (2015) observaram uma

RSP de 2,74 kPa em sistema de pastagem. Logo demonstra-se que a compactação é fortemente promovida pelo pisoteio de animais (LIMA et al. 2021). Além disso, a presença de um sistema radicular raso também pode contribuir para a compactação do solo em áreas de pastagem (COSTA et al., 2012).

Em todas as profundidades, os valores de RSP na área de pastagem estão acima do limite crítico de 2 MPa, considerado prejudicial para o desenvolvimento do sistema radicular de algumas espécie, no entanto depende da cultura utilizada (REYNOLDS et al., 2002). Na profundidade de 10-20 cm, a resistência do solo a penetração foi maior nas áreas os sistemas de açazal, mandiocal e pastagem em relação à Floresta Natural. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Neto et al. (2018), onde observaram maior RP em Latossolo sob açazal em sistema agrossilvipastoril. Essa resistência pode ser atribuída ao uso de máquinas pesadas, como tratores, que compactam-na (CORTEZ et al., 2014). Alta resistência do solo a penetração afeta o sistema radicular do açai, pois é bastante ramificado, reduzindo a exploração e assimilação de nutriente do solo.

Como reportados, nos nossos resultados, não foi observada diferença significativa nos níveis de microporosidade e umidade volumétrica do solo entre os diferentes sistemas de manejo (Tabela 2). A microporosidade do solo e umidade volumétrica são mais influenciadas pela composição granulométrica do solo e pelo nível de matéria orgânica presente (BAYAT et al., 2017; VIANA et al., 2011b). De acordo com Giarola, Tormena e Dutra (2007) a diminuição do volume total de poros nas áreas de pastagens pode ser atribuída à redução da macroporosidade, enquanto a microporosidade não parece ser diretamente afetada pelo manejo do solo. Observou-se uma correlação moderada entre PT e macroporosidade no sistema de mandiocal, nos sistemas de açai e pastagem não observou-se correlação positiva forte.

Verificou-se que houve uma diminuição significativa na macroporosidade o sistema de pastagem e cultivo de mandioca ao comparar floresta natural. Além disso, constatou-se que houve uma redução dos macroporos em diferentes profundidades na pastagem e cultivo de mandioca, sendo que as camadas de 5-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm apresentaram uma redução de macroporosidade menor que 10%. Resultados similares, em solo de pastagem, foram obtidos por (MANTOVANELLI et al., 2015) estudando a avaliação dos atributos do solo sob diferentes usos na região

de Humaitá, Sul do Amazonas, verificaram pastagem com a macroporosidade inferior a 10%, sendo $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para camada 0-5 cm e $0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para camada de 5-10 cm.

Conforme (STOLF et al., 2011) as plantas se desenvolver plenamente, com 10% ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) de macroporosidade do volume do solo, logo, é crucial manter a porosidade do solo dentro desse limite para assegurar o crescimento das plantas. No entanto, um cultivo em si próprio pode responder ao certo limite de porosidade dependendo do seu sistema radicular e manejo agrônomico. Entre outras funções, sabe-se que um nível de macroporosidade abaixo de 10% dificulta a difusão adequada de oxigênio para suprir as necessidades respiratórias das raízes e limita o crescimento (STOLF et al., 2011). Uma mudança significativa na macroporosidade no uso do solo, ocorre devido à intensificação da compactação do solo, que pode ser observada pelo aumento da densidade do solo (AZIZ; KARIM, 2016).

Em relação à distribuição granulométrica nos diferentes sistemas de usos, verificamos que ela diferiu entre os quatro sistemas de uso da terra em estudo Figura 4. Os maiores teores de argila foram encontrados em Floresta Natural de referência, nas profundidades de 5-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm, mas a diferença não excedeu a 16%. Enquanto o cultivo de mandiocal apresentou o menor os teores de areia em 33% e maior teor de silte em comparação com Floresta Natural.

Os valores encontrados de silte foram maiores que areia e argila em todos os sistemas, observou-se uma correlação negativa forte nos três sistemas estudado (Açaizal, Mandiocal e Pastagem). Estudos desenvolvidos por Campos et al. (2012) e Oliveira et al. (2013) em diferentes usos na região sul do Amazonas, constataram dominância da fração silte em todos os sistemas, onde se justifica pela natureza aluvial dos sedimentos que constituem o material de origem (FRANCISCON et al., 2019).

No entanto, o silte por ser uma fração de partículas intermediárias entre a argila e a areia (ROCHA; REZENDE, 2017), seu acúmulo no solo pode gerar problemas. Quando há excesso de silte, o solo pode se tornar compacto e perder a capacidade de retenção de água, prejudicando a drenagem e aeração necessárias para as plantas. Além disso, o solo rico em silte pode ser menos estável e suscetível à erosão, especialmente em áreas inclinadas, o que pode resultar em deslizamentos de terra e perda de nutrientes do solo (OLIVEIRA et al., 2016).

A distribuição agregados do solo são elementos fundamentais na estrutura do solo, sendo útil na identificação do manejo sustentável, desempenhando um papel crucial na decomposição da matéria orgânica e na ciclagem de nutrientes (CHEN et al., 2017). Além disso, eles exercem influência sobre outras características do solo, como porosidade, compactação e capacidade de retenção de água (RODRÍGUEZ et al., 2021). Nesse estudo a classes de agregados, na profundidade 0-5 cm e 10-20 cm observa-se que o sistema de pastagem e cultivo de açaizal apresentaram maior diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro o médio ponderado (DMP) e maior porcentagem de agregados na classe >2,00 mm, sendo a maior em superfície em 95,86%.

Esse aumento no tamanho dos agregados pode corresponder à maior pressão recebida nesse solo em razão da mecanização e do pisoteio animal. De acordo com Campos et al. (2015), a presença de uma alta porcentagem de agregados com diâmetros maiores encontrados na área de pastagem não indica, necessariamente, melhores condições de estrutura, aeração e macroporosidade do solo. Na verdade, esses valores de agregados são resultado de o solo estar compactado e apresentar maior resistência a penetração. Essa afirmação é corroborada pelos valores mais altos de densidade do solo e resistência do solo a penetração e pelos valores mais baixos de macroporosidade e porosidade total. Esse resultado foi corroborado por Portugal, Costa e Costa (2010) em seu estudo de classes de agregados sob diferentes usos na região da zona da mata mineira.

A degradação do solo e a de matéria orgânica estão intimamente ligadas, uma vez que resulta na deterioração da integridade estrutural do solo (VIANA et al., 2011b). Observou-se o maior acúmulo em superfície de matéria orgânica em pastagem em 32,04%, entre os sistemas de manejo quando comparado com Floresta Natural (MOS = 34,04 %) sendo ela com maior aporte, seguido por mandiocal (MOS = 25,07%) e açaizal (MOS = 19,83, %). Resultados similares foram observados por Araújo et al. (2011) onde constataram que o sistema de pastagem possui maior acúmulo de matéria orgânica em superfície em outros sistema de uso da terra. Isso se deve ao fato de haver um maior acúmulo de matéria orgânica na superfície do solo (CAMPOS et al., 2016).

Nesse sentido, ponderando a densidade, resistência a penetração, porosidade, macroporosidade, microporosidade, granulometria, agregação do solo, devem ser

levados em consideração quando se trata de melhorar a qualidade física do solo. Dessa forma estimular a diminuição dos impactos da mudança no uso da terra. Os autores Bravo-Medina et al. (2021), indicam que a implementação de sistemas agroflorestais desempenham um papel crucial na proteção do solo, pois a vegetação utilizadas nesses sistemas têm demonstrado proporcionar um ambiente mais favorável, o que resulta no aumento da atividade dos engenheiros do solo, como cupins, formigas e minhocas (RODRÍGUEZ et al., 2021).

Além de evitar o declínio do desempenho e/ou rentabilidade das culturas, bem como aos impactos ambientais negativos, na redução da erosão e na melhoria dos atributos relacionados à qualidade do solo (BRAVO et al., 2017). A diversidade do ecossistema amazônico e a análise dos solos na região são fundamentais para evitar a exploração insustentável dos recursos naturais. Dessa forma, os estudos sobre os atributos do solo são essenciais para embasar práticas agrícolas planejadas e implementar tecnologias que promovam o uso eficiente da terra, ao mesmo tempo em que preservam a biodiversidade. Essas informações podem orientar políticas públicas voltadas para o desenvolvimento sustentável da região (SOUZA et al., 2018).

8. CONCLUSÕES

Os diferentes sistemas de uso da terra influenciam os atributos e propriedades físicas do solo. Sistema de pastagens mostram maior resistência à penetração do solo e densidade do solo, no entanto não se observou-se correlação positiva (indicadores de compactação), em resposta ao historial de pastoreio. A porosidade total do solo é reduzida nas áreas de pastagem, indicando sua maior compactação, enquanto a floresta natural apresenta maiores valores de porosidade, sugerindo maior qualidade física do solo nesse sistema. Os sistemas de uso da terra apresentam diferente granulometria que corresponde às características da qualidade inerente de cada solo ocorrente no sistema em estudo.

A classes de agregados do solo foi maior nas áreas de pastagem. No entanto, é importante ressaltar que essa maior classe de agregados não necessariamente indica melhores condições de estrutura e porosidade do solo. O acúmulo de matéria orgânica foi maior nas áreas de pastagem, devido ao sistema radicular das gramíneas. Portanto, é fundamental adotar práticas de manejo adequadas para promover a sustentabilidade e a qualidade do solo na região amazônica. A implementação de sistemas agroflorestais e o manejo adequado da vegetação podem contribuir para a proteção do solo e a melhoria de seus atributos. Além disso, políticas públicas voltadas para o desenvolvimento sustentável da região devem ser baseadas em estudos como este, buscando conciliar o uso eficiente da terra com a preservação da biodiversidade

9. REFERENCIAS

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.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALVES, E. S. Avaliação de práticas conservacionistas em um sistema de produção de grãos no Núcleo Rural Taquara, Planaltina - DF. 13 maio 2021.

ALVES, H. DA S.; AZEVEDO, R. A. B. DE. Caracterização do manejo utilizado na classificação de solos por agricultores da região da Morraria - Cáceres/MT. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 11, n. 2, p. 15–22, 2011.

ARAÚJO, E. A. DE et al. Impacto da conversão floresta - pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Acta Amazonica**, v. 41, p. 103–114, mar. 2011.

ARAUJO, W. DE O. et al. Impactos na variabilidade espacial da densidade e porosidade do solo em função da transformação de floresta em pastagem no Vale do Jamari, Rondônia. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 15, p. e284111537170–e284111537170, 17 nov. 2022.

ARRUDA, F. A. A. DE; SILVA, J. C. M. DA; NORA, G. D. A territorialidade e a resistência na floresta amazônica. **Geopauta**, v. 7, p. e11708, 7 jul. 2023.

AZIZ, S. A.; KARIM, S. M. The Effect of Some Soil Physical and Chemical Properties on Soil Aggregate Stability in Different Locations in Sulaimani and Halabja Governorate. **Open Journal of Soil Science**, v. 6, n. 4, p. 81–88, 21 abr. 2016.

BACKES, M. A. Diversidade da macrofauna epiedáfica em diferentes usos do solo na área experimental da Universidade Federal da Fronteira Sul – Campus Cerro Largo. 6 dez. 2017.

BAUMHARDT, R. L.; STEWART, B. A.; SAINJU, U. M. North American Soil Degradation: Processes, Practices, and Mitigating Strategies. **Sustainability**, v. 7, n. 3, p. 2936–2960, mar. 2015.

BAYAT, H. et al. Effects of slope aspect, grazing, and sampling position on the soil penetration resistance curve. **Geoderma**, v. 303, p. 150–164, 1 out. 2017.

BELLO, O. DA C. Estudo da serapilheira, biomassa radicular e variáveis do solo: uma abordagem socioambiental na Amazônia. 30 jul. 2019.

BERGAMIN, A. C. et al. Compactação em um latossolo vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 681–691, jun. 2010.

BEZERRA, V. S.; FREITAS-SILVA, O.; DAMASCENO, L. F. Açaí: produção de frutos, mercado e consumo. 2016.

BRAGA, G. N. M. **NA SALA COM GISMONTI Assuntos sobre Agronomia: Reciclagem de Nutrientes do Solo. NA SALA COM GISMONTI Assuntos sobre Agronomia**, 15 mar. 2011. Disponível em: <<https://agronomiacomgismonti.blogspot.com/2011/03/reciclagem-de-nutrientes-do-solo.html>>. Acesso em: 24 ago. 2023

BRAVO, C. et al. Indicadores morfológicos y estructurales de calidad y potencial de erosión del suelo bajo diferentes usos de la tierra en la Amazonía Ecuatoriana. **Anales de Geografía de la Universidad Complutense**, v. 37, n. 2, p. 247–264, 17 out. 2017.

BRAVO-MEDINA, C. et al. A soil quality index for seven productive landscapes in the Andean-Amazonian foothills of Ecuador. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 6, p. 2226–2241, 2021.

BROWN, G. G. et al. Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais. 2015.

CAMPOS, M. et al. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá, AM. v. 6, 1 maio 2012a.

CAMPOS, M. C. C. et al. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **REVISTA AGRO@MBIENTE ON-LINE**, v. 6, n. 2, p. 102–109, 31 ago. 2012b.

CAMPOS, M. C. C. et al. Avaliação dos atributos do solo sob diferentes usos na região de Humaitá, Amazonas. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, n. 2, p. 122–130, 21 ago. 2015.

CAMPOS, M. C. C. et al. Estoque de carbono no solo e agregados em Cambissolo sob diferentes manejos no sul do Amazonas. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, p. 339–349, jun. 2016.

CARDOSO, E. J. B. N. et al. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? **Scientia Agricola**, v. 70, p. 274–289, ago. 2013.

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. [s.l.] Portal de Livros Abertos da USP, 2020.

CARDOSO, E. L. et al. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no Pantanal Sul-Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 613–622, abr. 2011.

CARMO, F. M. DA S. et al. Germinação do banco de sementes de espécies nativas sob dossel de espécies exóticas. **Revista Árvore**, v. 36, p. 583–591, ago. 2012.

CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 237–243, mar. 2011.

CAVALIERI, K. M. V. **Aspectos metodológicos da pesquisa sobre compactação e qualidade física do solo**. text—[s.l.] Universidade de São Paulo, 19 jul. 2007.

CHEN, G. et al. Soil aggregate characteristics and stability of soil carbon stocks in a *Pinus tabulaeformis* plantation. **New Forests**, v. 48, n. 6, p. 837–853, 1 nov. 2017.

CHERUBIN, M. R. et al. QUALIDADE FÍSICA, QUÍMICA E BIOLÓGICA DE UM LATOSSOLO COM DIFERENTES MANEJOS E FERTILIZANTES. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 615–625, abr. 2015.

CLUNES, J. et al. Soil fragility: A concept to ensure a sustainable use of soils. **Ecological Indicators**, v. 139, p. 108969, 1 jun. 2022.

CORTEZ, J. W. et al. Avaliação da intensidade de tráfego de tratores em alguns atributos físicos de um argissolo amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1000–1010, jun. 2014.

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. 2012.

COSTA, M. S. S. DE M. et al. Atributos físicos do solo e produtividade do milho sob sistemas de manejo e adubações. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 810–815, ago. 2011.

CUNHA, E. DE Q. et al. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho: I - atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 589–602, abr. 2011.

DALCHIAVON, F. C. et al. Variabilidade espacial da produtividade do feijoeiro correlacionada com atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistema de semeadura direta. **Bragantia**, v. 70, p. 908–916, 2011.

DAMACENO, J. B. D. Adsorção, cinética e disponibilidade de fósforo em latossolo amarelo e gleissolo háplico na Amazônia Central. 2 out. 2020.

DE LIMA, A. F. L. et al. Physical soil attributes in areas under forest/pasture conversion in northern Rondônia, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 1, p. 34, 21 dez. 2021.

DE MENESES, M. G. et al. Caracterização do solo em comunidades agrícolas no Município de Sousa para fins de produtividade. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 1, n. 48, p. 112, 3 mar. 2020.

DE SOUZA BRAZ, A. M.; FERNANDES, A. R.; ALLEONI, L. R. F. Soil Attributes After the Conversion from Forest to Pasture in Amazon. **Land Degradation & Development**, v. 24, n. 1, p. 33–38, 2013.

DO SOCORRO NUNES, D.; DA SILVA FARIAS, P. R.; VERAS DE LIMA, H. Atributos físicos e matéria orgânica em sistemas de uso do solo. **EDUCAmazônia**, v. 10, n. 1, p. 109–125, 2013.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and Assessing Soil Quality. Em: **Defining Soil Quality for a Sustainable Environment**. SSSA Special Publications. [s.l: s.n.]. p. 1–21.

FERREIRA, R. R. M.; FILHO, J. T.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 4, p. 913–932, 20 dez. 2010.

FIGUEIREDO, L. DE P. S. E. Agricultura de montanha: qualidade dos solos em sistemas agroflorestais sintrópicos. 4 nov. 2020.

FRANCHINI, J. C. et al. Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná. 2011.

FRANCISCON, U. et al. Soils characterization and classification in clean field, dirty field and forest areas in amazonian environments. **Bioscience Journal**, v. 35, n. 4, p. 1083–1098, 8 ago. 2019.

FRANTZ, V. R. et al. FLORESTA AMAZÔNICA. **Mostra Interativa da Produção Estudantil em Educação Científica e Tecnológica**, 30 set. 2017.

FREITAS, I. C. DE et al. Resistência à penetração em Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes formas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 1275–1281, dez. 2012.

FREITAS, L. DE et al. INDICADORES DA QUALIDADE QUÍMICA E FÍSICA DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO. **Revista Unimar Ciências**, v. 26, n. 1–2, 5 dez. 2017.

FREITAS, L. DE et al. Análise visual da qualidade estrutural de solos com diferentes sistemas de uso e manejo no Marajó, Município de Breves, Estado do Pará, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e470985504–e470985504, 18 jul. 2020.

FREITAS, L. DE [UNESP. Influência de fragmentos florestais nativos sobre os parâmetros químicos, físicos e microbiológicos de solos cultivados com cana-de-açúcar. **Aleph**, p. 112 f. : il., tabs., 22 jul. 2011.

FREIXIAL, R.; CARVALHO, M. As fases de transição e consolidação da agricultura de conservação e da sementeira directa (AC/SD) em culturas anuais nas condições mediterrâneas. 2 abr. 2013.

GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; DUTRA, A. C. Degradação física de um Latossolo Vermelho utilizado para produção intensiva de forragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 863–873, out. 2007.

GODINHO, T. DE O. Ciclagem de nutrientes via serapilheira em ecossistemas florestais naturais no Brasil. 23 jun. 2016.

HARRISON, R. B.; STRAHM, B. D. Soil Formation. Em: JØRGENSEN, S. E.; FATH, B. D. (Eds.). **Encyclopedia of Ecology**. Oxford: Academic Press, 2008. p. 3291–3295.

JESUS, G. V. DE et al. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS NA PRODUÇÃO DE FARINHA DE MANDIOCA NO MUNICÍPIO DE SANTA LUZIA NO NORDESTE PARAENSE. **Revista Agroecossistemas**, v. 12, n. 2, p. 24–33, 9 fev. 2021.

KARLEN, D. L. et al. Thirty-year tillage effects on crop yield and soil fertility indicators. **Soil and Tillage Research**, v. 130, p. 24–41, 1 jun. 2013.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Influência do manejo do solo na infiltração de água. **Revista Monografias Ambientais**, p. 3915–3925, 16 dez. 2014.

KUNZ, M. et al. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1699–1708, dez. 2013.

LANGE, A. et al. DEGRADAÇÃO DO SOLO E PECUÁRIA EXTENSIVA NO NORTE DE MATO GROSSO. **Nativa**, v. 7, n. 6, p. 642–648, 11 nov. 2019.

LAPEN, D. R. et al. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage Research**, v. 78, n. 2, p. 151–170, 1 ago. 2004.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. [s.l.] Oficina de Textos, 2016.

LIMA, A. C. R. et al. A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. **Applied Soil Ecology**, v. 64, p. 194–200, 2013.

LIMA, C. A. DE et al. Práticas agrícolas no cultivo da mandioca e suas relações com o escoamento superficial, perdas de solo e água. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 46, p. 697–706, dez. 2015.

LIMA, R. G. DE et al. Cianeto de Mandioca: viabilidade econômica do uso de manipueira para erradicação do mercúrio na mineração, e proposta para Bioeconomia Circular na Amazônia, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 7, p. e43211729981–e43211729981, 6 jun. 2022.

LIN, L. et al. Influence of soil physical and chemical properties on mechanical characteristics under different cultivation durations with Mollisols. **Soil and Tillage Research**, v. 224, p. 105520, 1 out. 2022.

LORENZONI-PASCHOA, L. DE S. et al. Estágio sucessional de uma floresta estacional semidecidual secundária com distintos históricos de uso do solo no sul do Espírito Santo. **Rodriguésia**, v. 70, p. e02702017, 19 jun. 2019.

MANHAES, C. M. C.; FRANCELINO, F. M. A. ESTUDO DA INTER-RELAÇÃO DA QUALIDADE DO SOLO E DA SERAPILHEIRA COM A FAUNA EDÁFICA UTILIZANDO ANÁLISE MULTIVARIADA. **Nucleus**, v. 9, n. 2, 25 out. 2012.

MANTOVANELLI, B. et al. Avaliação dos Atributos do Solo Sob Diferentes Usos na Região de Humaitá, Amazonas. **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, 28 ago. 2015.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, p. 349–354, jun. 2011.

MASCARENHAS, A. R. P. et al. Atributos físicos e estoques de carbono do solo sob diferentes usos da terra em Rondônia, Amazônia Sul-Occidental. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 89, p. 19–27, 31 mar. 2017.

MATOS, S. Custos de recuperação de áreas degradadas na Amazônia brasileira. **AgroANALYSIS**, v. 43, n. 2, p. 21–23, 1 jun. 2023.

MELO, G. DA S.; COSTA, F. S.; SILVA, L. C. DA. O cenário da produção do açaí (*Euterpe spp.*) no estado do Amazonas/ The production scenario of açaí (*Euterpe spp.*) in the state of Amazonas. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 7, p. 71536–71549, 15 jul. 2021.

MENTGES, M. I. et al. Propriedades físico-hídricas do solo e demanda energética de haste escarificadora em Argissolo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 315–321, mar. 2010.

MICCOLIS, A. et al. **Restauração ecológica com sistemas agroflorestais: como conciliar conservação com produção: opções para Cerrado e Caatinga**. [s.l.] Brasília, DF: Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal, 2016., 2016.

MINIGHIN, D. et al. Pastagens degradadas e técnicas de recuperação: Revisão. **Pubvet**, v. 11, n. 10, 29 ago. 2017.

MINIGHIN, E. C. et al. Açaí (*Euterpe oleracea*) e suas contribuições para alcance da ingestão diária aceitável de ácidos graxos essenciais. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e760986116–e760986116, 19 jul. 2020.

MION, R. L. et al. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo amarelo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 6, p. 2057–2066, 4 dez. 2012.

NETO, A. B. B. et al. MATÉRIA ORGÂNICA E ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE UM LATOSSOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO. **Revista Agroecossistemas**, v. 10, n. 2, p. 147–164, 19 nov. 2018a.

NETO, A. B. B. et al. MATÉRIA ORGÂNICA E ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE UM LATOSSOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO. **Revista Agroecossistemas**, v. 10, n. 2, p. 147–164, 19 nov. 2018b.

NEVES NETO, D. N. et al. Análise espacial de atributos do solo e cobertura vegetal em diferentes condições de pastagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 995–1004, set. 2013.

OLIVEIRA, BENHUR et al. RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM ÁREAS SOB O SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA, NA REGIÃO AMAZÔNICA. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, 1 dez. 2015a.

OLIVEIRA, B. O. S. DE et al. Avaliação dos solos e das águas nas áreas de influência de disposição de resíduos sólidos urbanos de Humaitá, Amazonas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, p. 593–601, 11 ago. 2016.

OLIVEIRA, I. A. DE et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1103–1112, ago. 2013.

OLIVEIRA, I. A. DE et al. Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Acta Amazonica**, v. 45, p. 1–12, mar. 2015b.

OLIVEIRA, R. DA C. DE. Partição da evapotranspiração em uma floresta de terra firme na Amazônia Central. 30 nov. 2020.

ORTIGARA, C. et al. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 619–626, abr. 2014.

PACHECO, L. P. et al. Influência da densidade do solo em atributos da parte aérea e sistema radicular de crotalária. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, p. 464–472, dez. 2015.

PARENTE, H. N.; MAIA, M. DE O. Impacto do pastejo sobre a compactação dos solos com ênfase no Semiárido. 2011.

PARRON, L. M. et al. **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. [s.l.] Brasília, DF : Embrapa, 2015., 2015.

PAVÃO, V. M. et al. Impacto da Conversão da Cobertura Natural em Pastagem e Área Urbana sobre Variáveis Biofísicas no Sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 343–351, set. 2017.

PEZZONI, T. et al. Influência de *Pterodon emarginatus* Vogel sobre atributos físicos e químicos do solo e valor nutritivo de *Brachiaria decumbens* Stapf em sistema silvipastoril. **CERNE**, v. 18, p. 293–301, jun. 2012.

PHILLIPS, O. L. et al. The changing Amazon forest. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1498, p. 1819–1827, 27 maio 2008.

PIRES, L. et al. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, 2 mar. 2011.

PODWOJEWSKI, P. et al. Land-use impacts on surface runoff and soil detachment within agricultural sloping lands in Northern Vietnam. **CATENA**, v. 74, n. 2, p. 109–118, 15 jul. 2008.

PORTUGAL, A. F.; COSTA, O. D. V.; COSTA, L. M. DA. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da Zona da Mata mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 575–585, abr. 2010.

PRADO, R. B. et al. Current overview and potential applications of the soil ecosystem services approach in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1021–1038, set. 2016.

PUTTHACHAROEN, S. et al. Nutrient uptake and soil erosion losses in cassava and six other crops in a Psamment in eastern Thailand. **Field Crops Research**, v. 57, p. 113–126, 1 maio 1998.

RAMOS, J. P. Análise comparativa entre uso e qualidade do solo na área do reservatório da UHE – Tucuruí com base nos atributos físicos e químicos. **1 CD-ROM**, 21 dez. 2018.

REDIN, M. et al. IMPACTOS DA QUEIMA SOBRE ATRIBUTOS QUÍMICOS, FÍSICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO. **Ciência Florestal**, v. 21, p. 381–392, jun. 2011.

REGO, A. K. C.; KATO, O. R. Agricultura de corte e queima e alternativas agroecológicas na Amazônia. **Novos Cadernos NAEA**, v. 20, n. 3, 15 maio 2018.

REYNOLDS, W. D. et al. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v. 110, n. 1, p. 131–146, 1 nov. 2002.

RIBEIRO, S. B. Atributos químicos, físicos e biológicos do solo em sistemas de uso da terra em Marabá, no sudeste do Pará. 5 jul. 2021.

RIVERA, R. A. **Caderno de casos: corredor seco na América central: agrofloresta e manejo de solos na terra Tecapa**. [s.l.] DAKI - Semiárido vivo, 2021.

ROCHA, M. T.; REZENDE, L. R. DE. Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, p. e, 2 out. 2017.

RODRÍGUEZ, L. et al. Agroforestry systems impact soil macroaggregation and enhance carbon storage in Colombian deforested Amazonia. **Geoderma**, v. 384, p. 114810, 15 fev. 2021.

RONQUIM, C. C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. 2020.

ROSSI, C. Q. et al. Vias de formação, estabilidade e características químicas de agregados em solos sob sistemas de manejo agroecológico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1677–1685, set. 2016.

SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. [s.l.] Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.

SANTOS, J. C. N. DOS et al. Land use impact on soil erosion at different scales in the Brazilian semi-arid1. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 48, p. 251–260, jun. 2017.

SANTOS, M. C. DOS. Qualidade do solo sob atividade agropecuária no sul do Amazonas. 30 mar. 2022.

SANTOS, G. G. et al. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1339–1348, out. 2011.

SCHEFFLER, R. et al. Soil hydraulic response to land-use change associated with the recent soybean expansion at the Amazon agricultural frontier. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 144, n. 1, p. 281–289, nov. 2011.

SCHOONOVER, J. E.; CRIM, J. F. An Introduction to Soil Concepts and the Role of Soils in Watershed Management. **Journal of Contemporary Water Research & Education**, v. 154, n. 1, p. 21–47, 2015.

SILVA, R. M. DA et al. Fauna do solo como bioindicadora da qualidade do solo em cultivos de cana-de-açúcar: um referencial teórico. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, p. e239101018741–e239101018741, 9 ago. 2021a.

SILVA, J. L. C. et al. ASPECTOS DA DEGRADAÇÃO AMBIENTAL NO NORDESTE DO BRASIL. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 180–191, 27 abr. 2018.

SILVA JUNIOR, C. A. DA; BOECHAT, C. L.; CARVALHO, L. A. DE. Atributos químicos do solo sob conversão de floresta amazônica para diferentes sistemas na região norte do Pará, Brasil. **Biosci. j. (Online)**, p. 566–572, 2012.

SILVA, M. DE O. et al. Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável / Soil quality: biological indicators for sustainable management. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 6853–6875, 20 jan. 2021b.

SILVA, R. B. et al. Growth, productivity and viability of irrigation in cassava crop in the Alagoas Coastal Plateaus. **Ciência Rural**, v. 52, p. e20210145, 22 out. 2021c.

SILVEIRA, A. R. Avaliação estrutural de um latossolo vermelho-amarelo sob manejos, uso e mata natural. 2019.

SOARES, M. D. R. et al. Atributos físicos do solo em áreas sob diferentes sistemas de usos na região de Manicoré, AM. **Revista de Ciências Agrárias - Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 59, n. 1, p. 9–15, 1 ago. 2016.

SOUSA, F. F. DE. Miriti: o Açaí do Inverno? extrativismo, comercialização e consumo de frutos de *Mauritia flexuosa* L.f. no Estuário Amazônico. <https://drive.google.com/file/d/19Skg-kp7V5d95NXu33J-tn7UpUojgeyw/view>, 2016.

SOUSA, O. N. DE et al. Chemical attributes of traditional agriculture and Caatinga managed at different depths in an Inceptisol. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 50–55, jan. 2017.

SOUZA, E. S. DE et al. Physical, chemical, and mineralogical attributes of a representative group of soils from the eastern Amazon region in Brazil. **SOIL**, v. 4, n. 3, p. 195–212, 7 set. 2018.

STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 1301–1309, dez. 2013a.

STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 1301–1309, dez. 2013b.

STOLF, R. et al. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 447–459, 1 abr. 2011.

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

TEIXEIRA, W. et al. Solos do Estado do Amazonas. Em: [s.l.: s.n.]. p. 71–86.

TELLES, T. S. et al. Valuation and assessment of soil erosion costs. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 3, p. 209–216, jun. 2013.

TIECHER, T. **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil : práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água**. [s.l.] UFRGS, 2016.

TRABAQUINI, K. et al. **Dinâmica e distribuição das áreas alteradas por ação antrópica no cerrado matogrossense no período de 2002 a 2008**. 1 maio 2011.

VIANA, E. T. et al. Atributos físicos e carbono orgânico em latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 2105–2114, dez. 2011a.

VIANA, E. T. et al. Atributos físicos e carbono orgânico em latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 2105–2114, dez. 2011b.

WASTOWSKI, A. D. et al. Caracterização dos níveis de elementos químicos em solo, submetido a diferentes sistemas de uso e manejo, utilizando espectrometria de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (EDXRF). **Química Nova**, v. 33, p. 1449–1452, 2010.

WERALUPITIYA, C. et al. Chapter 22 - Influence of biochar on soil biology in the charosphere. Em: TSANG, D. C. W.; OK, Y. S. (Eds.). **Biochar in Agriculture for**

Achieving Sustainable Development Goals. [s.l.] Academic Press, 2022. p. 273–291.

YANG, T.; SIDDIQUE, K. H. M.; LIU, K. Cropping systems in agriculture and their impact on soil health-A review. **Global Ecology and Conservation**, v. 23, p. e01118, 1 set. 2020.