

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

AVALIAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO
SOLO NA PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS,
SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO DA TERRA NO SUL
DO AMAZONAS

KEYTHIANE FREIRE RAMOS

ORIENTADOR: JOSÉ MAURÍCIO DA CUNHA
COORIENTADOR: JHONATAN RAFAEL ZÁRATE SALAZAR

Humaitá, AM
Abril/2025

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

**AVALIAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO
SOLO NA PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSITÊMICOS,
SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO DA TERRA NO SUL
DO AMAZONAS**

KEYTHIANE FREIRE RAMOS

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 Ciências Ambientais.

**ORIENTADOR: JOSÉ MAURÍCIO DA CUNHA
COORIENTADOR: JHONATAN RAFAEL ZÁRATE SALAZAR**

**Humaitá, AM
Abril/2025**

Ficha Catalográfica

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

R175a Ramos , Keythiane Freire

Avaliação dos atributos físicos e químicos do solo na prestação de serviços ecossistêmicos, sob diferentes sistemas de uso da terra no sul do Amazonas / Keythiane Freire Ramos . - 2025.
80 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): José Maurício da Cunha.

Coorientador(a): Jhonatan Rafael Zárate Salazar.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Humaitá – AM, 2025.

1. Qualidade do solo. 2. Serviços ecossistêmicos do solo. 3. Manejo do solo. 4. Carbono orgânico do solo. 5. Ciclagem de nutrientes. I. Cunha, José Maurício da. II. Salazar, Jhonatan Rafael Zárate. III. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. IV. Título

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

FOLHA DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO NA PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS, SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO DA TERRA NO SUL DO AMAZONAS. (Linha de Pesquisa 2: Sociedade, Biodiversidade e Sustentabilidade do bioma amazônico)

KEYTHIANE FREIRE RAMOS

Dissertação defendida e aprovada em 03 de abril de 2025 pela comissão julgadora:



Prof. Dr. José Maurício da Cunha
PPGCA-IEAA/JFAM – Orientador/Membro Titular Interno

Documento assinado digitalmente
gov.br JULIANE KAYSE ALBUQUERQUE DA SILVA QUER
Data: 28/08/2025 11:19:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador(a) Interno
Prof^a. Dr. Juliane Kayse Albuquerque da Silva Querino

Documento assinado digitalmente
gov.br ALINE LESSA DE SOUZA
Data: 28/08/2025 11:41:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador(a) ExernoProf^a. Dr. Aline Lessa de Souza

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



AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA-UFAM) pela oportunidade em cursar esse mestrado. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Amazonas (FAPEAM) pelo apoio financeiro durante à realização da pesquisa.

Aos meus orientadores por acreditar, apoiar e me incentivar, encorajando-me para meu crescimento profissional. Pelo acompanhamento nos momentos de dúvidas e por confiar em minhas decisões. Especialmente, a Rafael Zárte, pela orientação valiosa e apoio incondicional ao longo do caminho, “pelos puxões de orelha” e por suas seções terapêuticas durante às orientações.

A alguns professores e profissionais que admiro muito e que, acima de tudo, tornaram-se verdadeiros amigos. Agradeço imensamente à Larissa Sbghen Pelegrini, por me fazer enxergar à significância dos mais “singelos” e pequenos organismos, pela paciência e por tornar o ato de ensinar a mais bela das profissões. Ao Rudson de Jesus Holanda, cuja expertise e amizade enriqueceram minha jornada profissional de maneiras inestimáveis. A cada um de vocês, meu mais sincero agradecimento por serem fontes constantes de inspiração e apoio.

Aos meus familiares, especialmente à minha mãe Zila Freire Ramos, por ser meu alicerce diário e por sempre acreditar em meu potencial, és uma mulher espetacular. Ao meu marido José Edilson, pelo companheirismo diário e por todos os acolhimentos nos momentos de angústias e desespero, por sempre segurar minhas mãos. Ao meu filho, Lucas Gabriel que na ingenuidade de seus 7 anos, me fez correr atrás dos meus sonhos dedicando-me às pesquisas e à ciência. Ao meu compadre Gino, por partilhar comigo esta jornada e por sempre disponibilizar-se em me levar à Universidade sempre que precisei.

A Deus por permitir estar viva e por ter saúde para caminhar em dias difíceis, pela proteção diária, e por colocar em meu caminho pessoas boas e intencionadas em me ajudar.

SUMÁRIO

LISTA DE QUADRO.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE ABREVIACOES E/OU SÍMBOLOS	xiii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.	xv
1. INTRODUÇÃO	16
2. JUSTIFICATIVA E PROBLEMÁTICA	18
3. HIPÓTESE.....	19
4. OBJETIVOS	19
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
5.1 Qualidade do Solo e Serviços Ecossistêmicos.....	20
5.2 Atividade Agrícola na Região Amazônica	23
5.3 Caracterização das Culturas de Açai e Mandioca.....	25
5.4 Conversão de áreas Florestais em Pastagens	27
6. MATERIAL E MÉTODOS	32
6.1 Abordagem da Pesquisa.....	32
6.1.2 Seleção dos atributos e Relação com os SE.....	34
6.3 reas de Estudo	34
6.4 Análises químicas do solo	37
6.5 Análises Físicas do Solo	39
6.5 Análise Estatística.....	40
7. RESULTADOS	40
7.1 Estatística Descritiva dos Indicadores Químicos do Solo	40
7.2 Estatística Descritiva dos Indicadores Físicos do Solo.....	45

7.3 Correlação de Pearson	47
7.4 Análise dos componentes principais (ACP)	55
8. DISCUSSÃO	57
8.1 Atributos químicos do solo	57
8.2 Atributos físicos do solo	62
8.3 Interação dos atributos físicos e químicos do solo	62
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
9.1 Limitações do Estudo e Perspectivas Futuras	66
10. CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS	68

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 – Cultivo agronômico do Amazonas.....	21
---	-----------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Atributos e indicadores da qualidade do solo.....	19
Figura 2 – Diagrama conceitual que vincula o manejo integrado sustentável de nutrientes às propriedades do solo, funções e serviços ecossistêmicos.....	20
Figura 3 – Representação gráfica simplificada do processo de degradação de pastagens cultivadas em suas diferentes etapas no tempo.....	26
Figura 4 – Efeito do uso da terra nos serviços ecossistêmicos.....	27
Figura 5 – Mapa de localização aproximado da área de estudo com áreas de açaí, pastagem, mandioca e floresta.....	31
Figura 6 – Áreas de estudo.....	33
Figura 7 – Metodologia de campo.....	34
Figura 8 – Análise de densidade.....	36
Figura 9 – Análise de componentes principais.....	51
Figura 10 – Lixiviação de nutrientes.....	52
Figura 11 – Dinâmica de CO em sistema de pastagem.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação dos atributos com os serviços ecossistêmicos do solo.....	29
Tabela 2 – Seleção dos atributos e Relação com os SE.....	30
Tabela 3 – Descrição de uso e histórico das áreas sob pastagem, açcaizal, mandioccal e Floresta Natural na região Sul do Amazonas.....	32
Tabela 4 – Teste de médias para pH em água, acidez potencial e Alumínio trocável, sob diferentes sistemas de uso da terra.....	38
Tabela 5 – Teste de médias para carbono orgânico total, Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , P, sob diferentes sistemas de uso da terra.....	39
Tabela 6 – Teste de médias para soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica efetiva (t), capacidade de troca catiônica potencial (T), saturação por base (V%) e saturação por alumínio (m%) sob diferentes sistemas de uso da terra.....	41
Tabela 7 – Atributos físicos do solo sob quatro sistemas de uso em diferentes camadas.....	42
Tabela 8 – Coeficientes de correlação de Pearson dos indicadores químicos e físicos do solo para o sistema açcaizal.....	46
Tabela 9 – Coeficientes de correlação de Pearson dos indicadores químicos e físicos do solo para o sistema mandioccal.....	47
Tabela 10 – Coeficientes de correlação de Pearson dos indicadores químicos e físicos do solo para pastagem.....	48
Tabela 11 – Coeficientes de correlação de Pearson dos indicadores químicos e físicos do solo para o sistema floresta natural.....	49

LISTA DE ABREVIações E/OU SÍMBOLOS

AS – Serviços Ambientais

ACP – Análise de Componentes Principais

SB – Soma de bases

Ca²⁺ – Cálcio

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COS – Carbono Orgânico do Solo

FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

GPS – Sistema de Posicionamento Global

H+Al – Acidez potencial

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IQS – Índice de Qualidade do Solo

K⁺ – Potássio

m% – Saturação por Alumínio

Mg²⁺ – Magnésio

MEA – Millennium Ecosystem Assessment

P – Fósforo disponível

pH – Potencial Hidrogeniônico

QS – Qualidade do solo

SE – Serviços Ecossistêmicos

SQ – I Índice de Qualidade do Solo

TFSA – terra fina seca ao ar

T – Capacidade de Troca Catiônica Potencial

t – Capacidade de Troca Catiônica Efetiva

RESUMO

RAMOS, K. F. **Avaliação dos atributos físicos e químicos do solo na prestação de serviços ecossistêmicos, sob diferentes sistemas de uso da terra no Sul do Amazonas.** Humaitá-AM, 2025. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciências ambientais) – Instituto de Educação Agricultura e Ambiente/ Universidade Federal do Amazonas.

A conversão de áreas florestais em espaços agrícolas tem gerado mudanças expressivas na qualidade dos solos da Amazônia. Essas transformações geram impactos ambientais que, por sua vez, afetam os serviços ecossistêmicos do solo, tornando essencial a avaliação de indicadores de qualidade do solo, que sejam mensuráveis, economicamente viáveis e representativos das funções do solo. Nesse sentido, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar os indicadores físicos e químicos do solo, sob diferentes sistemas de uso da terra, no sul do Amazonas: açazal, mandiocal, pastagem e floresta natural (área de referência). As coletas foram realizadas entre os meses de novembro e dezembro de 2022. Nas áreas foram demarcados 15 pontos amostrais aleatórios distribuídos, por meio da abertura de pequenas trincheiras nas camadas de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm, nas quais foram coletadas amostras deformadas em forma de torrão, acondicionadas em sacos plásticos identificados. Complementarmente, realizou-se coletas em forma de anel volumétrico para avaliação dos atributos físicos e carbono orgânico 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, AM, Brasil. Os dados resultantes das análises laboratoriais foram submetidos à análise estatística descritiva e análise multivariada, sendo que as comparações das médias das variáveis dentro de cada ambiente foram analisadas pelo teste de Tukey a 5 % probabilidade. A pastagem obteve maiores teores de carbono orgânico do solo nas camadas em todas as profundidades, contribuindo para a o fornecimento do serviço ecossistêmico de armazenamento de CO no solo, por outro lado, apresentou maior compactação e menor relação com o serviço ecossistêmico de retenção de água. A Floresta Natural fornece o serviço ecossistêmico de retenção de água, atribuído principalmente à correlação com o atributo umidade gravimétrica. O sistema açazal oferece serviços ecossistêmicos de ciclagem de nutrientes, porém apresenta menores teores de umidade gravimétrica, e, conseqüentemente, menos retenção hídrica. Por fim, o sistema mandiocal foi o sistema que menos contribuiu para a prestação de serviços ecossistêmicos com teores de carbono intermediários entre o sistema de pastagem e açáí.

Palavras-chaves: Qualidade do Solo, Serviços Ecossistêmicos do Solo, Manejo do Solo, Carbono Orgânico do Solo, Ciclagem de nutrientes.

ABSTRACT

RAMOS, Keythiane Freire. **Assessment of soil physical and chemical attributes in the provision of ecosystem services, under different land use systems in Southern Amazonas.** Humaitá-AM, 2025. 78f. Dissertação (Mestrado em ciências ambientais) – Instituto de Educação Agricultura e Ambiente/ Universidade Federal do Amazonas de Humaitá-AM, Humaitá-AM, 2023.

The conversion of forest areas into agricultural spaces has generated significant changes in the quality of soils in the Amazon. These transformations generate environmental impacts that, in turn, affect soil ecosystem services, making it essential to evaluate soil quality indicators that are measurable, economically viable, and representative of soil functions. In this sense, the objective of this research was to evaluate the physical and chemical indicators of the soil, under different land use systems, in the southern Amazonas. For this, four environments with specific characteristics for each use system were selected: açai plantation, cassava plantation, pasture, and natural forest, the latter used as a reference area. The collections were carried out between the months of November and December 2022. For the cropping systems, 15 random sampling points were demarcated distributed throughout the areas. By opening small trenches (figure 5) in the 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm and 20-40 cm layers, samples were collected in the form of clods and stored in identified plastic bags. In addition, samples were collected in the form of volumetric rings (figure 5) to evaluate the physical attributes and organic carbon of the soil. Soil analyses were performed at the Laboratory of Soda Biology of the Institute of Education, Agriculture and Environment – IEAA, of the Federal University of Amazonas – UFAM, in Humaitá, AM, Brazil. The data resulting from the laboratory analyses were subjected to descriptive statistical analysis and multivariate analysis, and comparisons of the means of the variables within each environment were analyzed by the Tukey test at 5% probability. The pasture had higher soil organic carbon contents in the layers at all depths, contributing to the provision of the ecosystem service of soil CO storage; on the other hand, it presented greater compaction and a lower relationship with the ecosystem service of water retention. The Natural Forest provides the ecosystem service of water retention, attributed mainly to the correlation with the gravimetric moisture attribute. The açai system offers ecosystem services of nutrient cycling, but has lower gravimetric moisture contents and, consequently, less water retention. Finally, the cassava system was the system that contributed least to the provision of ecosystem services, with carbon contents intermediate between the pasture and açai systems.

Keywords: Soil Quality, Soil Ecosystem Services, Soil Management, Soil Organic Carbon, Nutrient Cycling.

1. INTRODUÇÃO

As definições e conceitos a respeito do solo, foram introduzidas na humanidade há mais de um século. Inicialmente, essas definições baseavam-se em aspectos geológicos, químicos ou agrônômicos. Com a evolução da ciência do solo como uma área de estudo independente, os conceitos passaram a focar mais na composição e na ideia do solo como um organismo vivo (Mcbratney e Hartemink, 2024). Nos últimos anos, novas definições têm surgido (Johnson, 1998; Kristensen e Rabenhorst, 2015; Hartemink, 2015). Elas variam entre enfoques utilitários e edáficos, abordagens que veem o solo como sistemas abertos e dinâmicos, e perspectivas que o consideram um recurso precioso, limitado e ameaçado por atividades humanas, além de degradado em muitas regiões do mundo. A maioria dessas definições tende a ser extensa, exigindo várias frases para abarcar sua complexidade (Cahyana e Mulyanto, 2024).

McBratney e Hartemink (2024) apresentaram duas definições de solo, uma mais breve e outra mais detalhada, ambas formuladas em uma única frase. Na versão mais curta, o solo é descrito como "o material em camadas na superfície terrestre, formado por processos químicos, biológicos e pela organização física de minerais e matéria orgânica, que sustenta os ecossistemas terrestres e a humanidade". Já na definição mais completa, o solo é caracterizado como "uma mistura horizontalizada de materiais sólidos, líquidos e gasosos na superfície da Terra, formada por processos químicos, biológicos [...] incluindo a biodiversidade, plantas, animais e a humanidade". Os autores justificam que ambas as definições abordam o solo como corpo vivo, parte do ecossistema e um sistema terrestre funcional, em vez de um simples componente material.

Os solos desempenham um papel fundamental nos ecossistemas, fornecendo diversas funções que podem ser classificadas em quatro categorias de serviços ecossistêmicos (SE): provisão, regulação, culturais e suporte. Os serviços de provisão incluem produtos obtidos dos ecossistemas, como alimentos fibras e madeiras; os serviços de regulação envolvem processos que mantêm o equilíbrio ambiental, como a purificação da água e a regulação climática; os serviços culturais englobam benefícios não materiais, como recreação e educação; e os serviços de suporte são aqueles necessários para a produção de todos os outros SE, como a ciclagem de nutrientes e a produção primária. Neste contexto, o solo é essencial, pois suas funções

e processos sustentam a prestação desses serviços ecossistêmicos (Millenium Ecosystem Assessment, 2005).

Com a finalidade de contribuir com o monitoramento e capacidade do solo em definir suas funções e serviços ecossistêmicos (SE) prestados, a identificação e avaliação dos indicadores de qualidade do solo (QS) que sejam mensuráveis, acessíveis economicamente e representativos das funções do solo torna-se fundamental e desafiadora (Wade et al., 2022). Na literatura, alguns estudos limitaram-se ao uso de um ou dois indicadores, como o carbono orgânico do solo e suas frações (Bongiorno et al., 2019), enquanto outros desenvolvidos na Amazônia, focaram principalmente em indicadores biológicos (Visscher et al., 2024), físicos (Júnior et al., 2017), químicos (Jordão et al., 2018) ou na integração deles (Zárate-Salazar et al., 2024). Apesar de ser uma abordagem prática e econômica, a utilização de apenas um indicador não é amplamente recomendada, já que nem sempre representa adequadamente a saúde do solo (Bedolla-Rivera et al., 2023).

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi avaliar os atributos físicos e químicos do solo em ambiente natural e em diferentes sistemas de uso da terra no Sul do Amazonas, verificando a influência das variáveis físicas: densidade, argila e umidade gravimétrica, e químicas: acidez do solo (pH), teores de Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}), Potássio (K^+), Fósforo (P) disponível, Acidez Potencial (H+Al), Soma de Bases (SB), Capacidade de Troca Catiônica Efetiva (t), Capacidade de Troca Catiônica Potencial (T), Saturação por Alumínio (m) e Carbono Orgânico Total (COT) na prestação de serviços ecossistêmicos do solo.

2. JUSTIFICATIVA E PROBLEMÁTICA

Os solos são considerados ecossistemas responsáveis por sustentar a vida na Terra, ao fornecer funções e serviços (FAO 2015). No entanto, a intensificação e os múltiplos usos da terra, como agricultura, silvicultura, pecuária e expansão urbana, têm causado expressivos efeitos na oferta de serviços essenciais para a vida, incluindo a produção de alimentos, ciclagem de nutrientes, regulação de enchentes, redução dos gases do efeito estufa, controle da erosão e a manutenção de habitats para a fauna e a flora. Apesar de sua importância, a maioria dos estudos na região Amazônica descreveu o ecossistema com foco apenas nos atributos físicos, químicos e biológicos (Wade et al., 2022) com pouca ou nenhuma ênfase nos SE. São documentados conhecimentos consideráveis sobre solos, sua formação, composição e distribuição, mas a compreensão sobre suas funções e SE é considerada uma lacuna científica (Dominati et al., 2010).

Na região Amazônica, culturas como açaí (nome científico) e mandioca (nome científico), além do destaque no setor econômico também fazem parte da cultura de comunidades ribeirinhas e populações tradicionais, e podem contribuir para oferta de SE. O açaí conquistou notoriedade nacional e mundial, em virtude de sua composição rica em fibras alimentares, gorduras, proteínas e possibilidade de produtos com derivações do fruto. Entretanto, esse crescimento tem exigido dos produtores a utilização de fertilizantes químicos, frequentemente aplicados para aumentar a produtividade do cultivo, sujeitos a efeitos no estoque de carbono, na composição do solo e na ciclagem de nutrientes. A mandioca, historicamente associada à agricultura de subsistência, tem se consolidado no mercado nacional. Porém, a remoção da cobertura vegetal para seu cultivo pode comprometer a estrutura e fertilidade do solo, intensificando a erosão e prejudicando os ciclos naturais de nutrientes.

No contexto agrícola, a forma mais palpável de SE são os resultados tangíveis de um serviço de fornecimento, como: alimentos, fibras, energia e produtos farmacêuticos (Mérida et al., 2022). As pastagens, por sua vez, podem oferecer também serviços na produção de leite ou carne, como armazenamento de carbono, controle de erosão, manutenção da biodiversidade do solo e retenção de nutrientes. No entanto, maximizar a produção do sistema pecuário para atender as demandas alimentares da população, pode prejudicar a capacidade desses ambientes em

fornecer esses e outros serviços, com efeitos na degradação do solo, compactação, perda de nutrientes e emissão de gases de efeito estufa. Diante desses desafios, esta pesquisa se justifica pela necessidade de avaliar os atributos físicos e químicos do solo na prestação de SE, sob diferentes manejos, com intuito de responder a seguinte pergunta: Quais variações significativas nos atributos físicos e químicos do solo entre os ambientes de pastagem, mandiocal e açazal, em comparação com a Floresta Natural, e como essas diferenças impactam a prestação de serviços ecossistêmicos do solo?

3. HIPÓTESE

Os atributos físicos e químicos do solo apresentam variações significativas entre os ambientes de pastagem, mandiocal e açazal, em comparação com a Floresta Natural, que mantém maiores níveis de nutrientes e fornecimento de SE.

4. OBJETIVOS

4.1. Geral:

Avaliar os atributos físicos e químicos na prestação de serviços ecossistêmicos do solo, sob diferentes sistemas de uso da terra, no Sul do Amazonas.

4.2. Específicos:

- Determinar às propriedades físicas e químicas do solo sob cultivo de mandioca, açaí, pastagem e floresta natural;
- Estimar o carbono orgânico (CO) em sistemas de uso da terra e em área de floresta natural;
- Verificar a influência do sistema de uso da terra na prestação de serviços ecossistêmicos do solo em comparação com a Floresta Natural.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 Qualidade do Solo e Serviços Ecossistêmicos

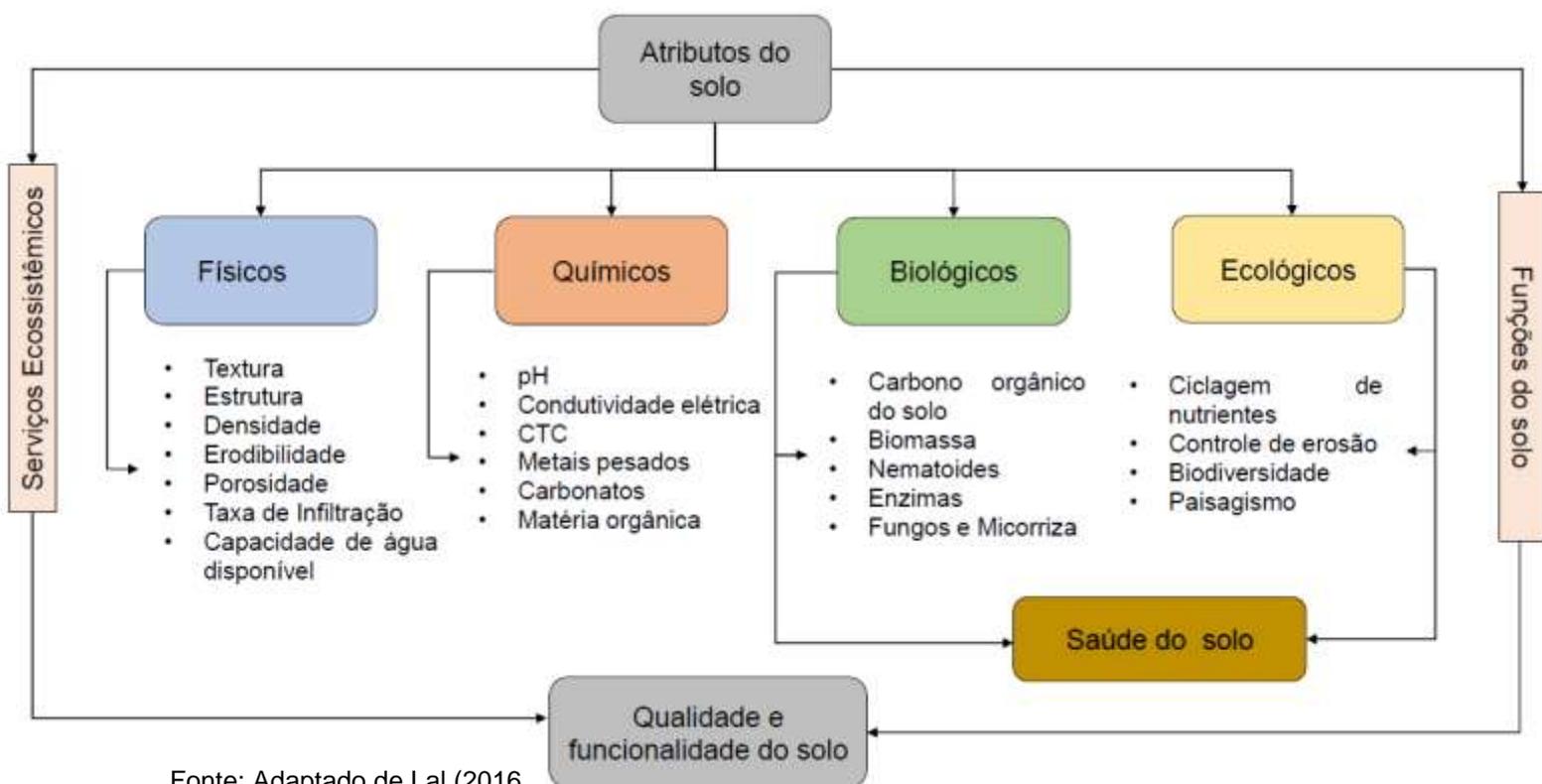
A qualidade do solo refere-se à sua capacidade em desempenhar funções dentro dos limites do ecossistema e do uso da terra, com o objetivo de sustentar a produtividade agrícola (Doran & Parkin, 1994). Por outro lado, a saúde do solo abrange aspectos ecológicos, sendo definida como a capacidade contínua do solo de funcionar como um ecossistema vivo e vital, sustentando plantas, animais e humanos (Lal, 2016). Complementando esses conceitos, os SE são serviços necessários à sobrevivência humana, que representam o capital da natureza, mas estão sob pressão constante da intensificação e expansão das atividades antrópicas. Esses SE têm dimensões sociais, ecológicas, econômicas, culturais e desempenham funções como suporte, fornecimento, regulação e serviços culturais (Baer & Birgé, 2018). Assim, enquanto a qualidade do solo foca na funcionalidade para a produção agrícola, a saúde do solo destaca o equilíbrio biológico e ecológico, e os serviços ecossistêmicos abordam sua contribuição para a sustentabilidade ambiental e o bem-estar humano.

A QS não pode ser diretamente medida, mas é avaliada por meio de indicadores, índice de qualidade do solo (IQS), que refletem suas propriedades e processos. Ao avaliar a qualidade do solo, é essencial analisar os atributos químicos, físicos e biológicos de forma correlacionada (Mendes et al., 2019; Bunemann et al., 2020). Segundo Doran & Parkin (1996), esses indicadores devem: (1) estar relacionados aos processos do agroecossistema, (2) integrar aspectos físicos, químicos, biológicos e ecológicos, (3) ser facilmente aplicados em campo, (4) sensíveis às mudanças no manejo e clima, e (5) fazer parte de um banco de dados de solos, quando viável. Indicadores qualitativos desempenham um papel essencial, sobretudo quando em consonância com as práticas agrícolas. O que possibilita avaliar as limitações na produção em suas propriedades, integrando-os ao processo de monitoramento do progresso ou regressão alcançados.

Estudos apontam que os IQS, são ferramentas altamente eficazes para avaliar a QS em diferentes escalas espaciais e regionais, bem como relacionar os resultados com os SE prestados (Karlen et al. 1997; Norfleet et al. (2003); Nabiollahi et al. 2017; Mirghaed et al. 2022). Doran e Parkin (1997) propuseram métodos de avaliação de

QS, que envolvem a escolha de indicadores de solo a partir de um conjunto de dados, por meio de análises multivariadas e/ou critérios estabelecidos por especialistas de acordo com a importância deles na fertilidade do solo. Esses indicadores são submetidos a transformações por meio de métodos de pontuação padronizados e, em seguida, integrados em IQS utilizando abordagens matemáticas (Andrews et al. 2002; Shukla et al. 2006; Vazu et al. 2024). Embora haja uma variedade de indicadores, utilizadas para avaliar a QS, ainda há muitas dúvidas sobre quais são mais eficazes para representar resultados específicos relacionados à QS e ao funcionamento do ecossistema (Bedolla-Riveira et al., 2023).

Figura 1–Atributos e indicadores da qualidade do solo.



De acordo com Lal (2016) a avaliação da QS do solo se dá por meio de atributos que englobam (Figura 1): (1) características físicas que facilitam a aeração à circulação de água e trocas gasosas, além de proporcionar habitat; (2) aspectos químicos que influenciam à acidez, à disponibilidade e transformação de nutrientes; (3) elementos biológicos que fornecem energia, alimentos e participam na ciclagem de nutrientes; e (4) aspectos ecológicos que contribuem para processos hidrológicos,

equilíbrio energético e configuração paisagística. Esses atributos, tanto isoladamente quanto em conjunto, criam condições favoráveis para a vida e são influenciados pelas interações do ambiente. Assim, a saúde do solo é resultado das interações dos atributos biológicos e ecológicos que impactam diretamente os serviços ecossistêmicos, afetando o fornecimento de nutrientes, regulação de água, sustentação da biodiversidade e influência do ciclo biogeoquímico do carbono (Lal, 2016).

Figura 2– Diagrama conceitual que vincula o manejo integrado sustentável de nutrientes às propriedades do solo, funções e serviços ecossistêmicos.



Fonte: Adaptado de Gogoi et al. (2021).

Um solo saudável, promove de maneira sustentável, importantes serviços ecossistêmicos, como a regulação climática, controle da erosão, ciclagem de nutrientes e manutenção da biodiversidade (Dominati et al., 2010). Contudo, as investigações sobre esses serviços muitas vezes não contemplam informações suficientes sobre os componentes do solo (Liu et al., 2010). Esses serviços estão relacionados às características do solo, que são fundamentais para sua funcionalidade, como demonstrado na Fig. 2, e sofrem influência das práticas de manejo aplicadas (Adhikari e Hartemink, 2016). Em uma análise recente, os autores destacam que as características do solo são essenciais para o desempenho das suas

funções, afetando diretamente serviços ecossistêmicos como o sequestro de carbono, o armazenamento e a ciclagem de nutrientes, a biodiversidade no solo, a produção de alimentos e a produtividade vegetal.

5.2 Atividade Agrícola na Região Amazônica

O avanço da agropecuária na Amazônia trouxe impactos ambientais consideráveis, como o aumento do desmatamento, perda da biodiversidade e alteração nos serviços ecossistêmicos essenciais para manutenção da vida. Essas mudanças na cobertura do solo representam grandes desafios para a preservação da sustentabilidade do ecossistema, principalmente quando áreas antes cobertas por vegetação natural são substituídas pela ação humana (Silva et al., 2024b). O bioma Amazônico ocupa cerca de 4,2 milhões de quilômetros quadrados, representando quase metade da área total do país (IBGE, 2019). Em termos econômicos, o PIB da Amazônia Legal no primeiro trimestre de 2023 atingiu aproximadamente R\$ 38 milhões com setor agropecuário contribuindo com 3,81% para economia local (SEDECTI, 2023).

O Código Florestal (lei nº 12.651/2012), estipula a obrigação dos proprietários de terras na Amazônia Legal em manter 80% da cobertura florestal em suas fazendas, a chamada Reserva Legal (Azevedo et al., 2017; Lapola et al., 2023). Apesar dessas diretrizes, a conversão de solos nessa região para uso agropecuário vem crescendo exponencialmente. Entre 1985 e 2023, a área destinada a pastagens no bioma aumentou mais de 363% (de 12,7 milhões para 59 milhões de hectares), o que representa 14% da Amazônia em 2023. Esse crescimento indica que mais de 90% das áreas desmatadas na Amazônia tiveram como primeiro uso a pastagem. Além disso, a área agrícola na região cresceu 47 vezes no mesmo período, impulsionada principalmente pelo cultivo de soja, que em 2023 ocupava 5,9 milhões de hectares, correspondendo a 80,5% das lavouras temporárias. A expansão agropecuária também afetou áreas úmidas do bioma, que perderam 3,7 milhões de hectares entre 1985 e 2023, dos quais 3,1 milhões foram convertidos em pastagem (Projeto MapBiomias, 2024).

A atividade econômica da agricultura se divide em dois tipos de lavouras: temporárias e permanentes. As lavouras temporárias consistem em plantações com ciclo de vida curto, sujeitas ao replantio após a colheita. A cultura permanente não

requer replantio após cada colheita, permanecendo no solo e permitindo múltiplas safras (Marion, 2014). No Amazonas, os principais produtos da lavoura permanente são: banana (*Musa* spp.), coco da baía (*Cocos nucifera*), laranja (*Citrus* spp.), mamão (*Carica papaya* L.), e café (*Coffea* spp.). Na lavoura temporária: cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), mandioca (*Manihot* spp.), melancia (*Citrullus* spp.), abacaxi (*Ananas* spp.) e milho (*Zea* spp.). Apesar da redução de 7,83% na produtividade em relação ao ano anterior, a mandioca se destaca como principal produto da lavoura temporária do Amazonas, alcançando o volume de produção de 889.002 toneladas em 2017. Na lavoura permanente o destaque é à banana, com produção de 113.272 toneladas em cachos, uma expansão de 9,4% quando comparada com a produção de 2016, cujo volume foi de 103.477 toneladas em cachos, conforme o Quadro 1 (IBGE, 2017).

Quadro 1 – Cultivo agrônomo, área destinada à colheita, quantidade produzida e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes mais representativas do Estado do Amazonas de acordo com último censo Agropecuário do IBGE em 2017.

Cultivo agrônomo		Quantidade produzida (t)	Área destinada à colheita (ha)	Valor da produção (R\$)
Lavouras Permanentes	Banana (<i>Musa</i> spp.)	113.272 (9,46%)	8.071	156.906.000,00
	Coco da baía (<i>Cocos nucifera</i>)	6.620.000 (50,66%)	1.589	6.365.000,00
	Açaí (<i>Euterpe</i> spp.)	62.329 (18,08%)	5.022	97.080.000,00
	Laranja (<i>Citrus</i> spp.)	45.775 (10,13%)	2.784	71.880.000,00
	Mamão (<i>Carica papaya</i> L.)	28.936 (11,49 %)	1.276	60.238.000,00
	Mandioca (<i>Manihot</i> spp.)	889.002 (-7,83%)	78.088	756.425.000,00
	Cana-de-açúcar (<i>Saccharum</i> spp.)	252.734 (4,83%)	3.962	66.296.000,00

Lavouras Temporárias	Melancia (<i>Citrullus</i> spp.)	69.967 (9,88 %.)	4.362	88.027.000,00
	Abacaxi (<i>Ananas</i> spp.)	37.562 (7,9479)	2.101	121.517.000,00
	Milho (<i>Zea</i> spp.)	8.114 (-8,33 %)	3.612	6.719.000,00

Fonte: Adaptado do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017).

Com base nos dados apresentados no Quadro 1, pode-se inferir que os cultivos de coco da baía, açaí, banana e mandioca se destacam tanto em termos de quantidade produzida quanto em valor de produção. Esses cultivos representam uma parte significativa da produção agrícola do estado, contribuindo de forma substancial para a economia local. Estudos têm demonstrado que à Amazônia ao longo dos anos, tem enfrentado desafios no mercado para produtos regionais, como o cacau, borracha, guaraná, pupunha, jambu, açaí e cupuaçu, que foram ou estão sendo transplantados para outras regiões do país e até mesmo para o exterior (Homma, 2010). Por outro lado, é importante salientar que a gestão ineficiente dos recursos naturais na Amazônia, mas especificamente do solo influenciará os processos físicos, químicos e biológicos desse sistema, modificando seus atributos e por conseguinte afetando os serviços ecossistêmicos oferecidos por esses ambientes (Lal e Bruce, 1999).

5.3 Caracterização das Culturas de Açaí e Mandioca

A produção agrícola na região Amazônica enfrenta diversos desafios que requerem uma abordagem abrangente, considerando as dimensões sociais, ambientais, culturais e econômicas. Nos sistemas agrícolas da Amazônia, destaca-se a predominância da economia por subsistência, caracterizada pela escolha de culturas adaptadas ao ambiente local, promovendo a organização comunitária dos

produtores locais. O cultivo de plantas como mandioca e açaí desempenha um papel central nesse cenário (Embrapa, 2020).

A mandioca comumente conhecida por macaxeira ou aipim, pertence à família das Euphorbiaceae, possui origem Sul Americana, sendo bastante cultivada no passado pelos indígenas os quais foram responsáveis por sua distribuição (Ribeiro et al., 2019). Existem dois grandes grupos de *Manihot spp.*, a *Manihot esculenta* e *Manihot utilíssima*, tais grupos também são conhecidos como mandioca seca e 'mandioca d'água'. A primeira popularmente chamada de mandioca brava ou amarga, e o segundo grupo se apresenta como mandioca mansa, macaxeira, aipim e mandioca doce (Chisté et al., 2010).

Os estudos botânicos sobre a mandioca são limitados, mas Siviero e Schott (2011) a descrevem como plantas com folhas verdes e roxas, lóbulos lisos, podendo apresentar ramificações e atingir alturas entre 1,30 e 3,60 metros. Os frutos podem ser brancos ou amarelos. A diferenciação entre as variedades é difícil visualmente, exigindo análises especializadas. A mandioca demonstra resistência à seca e possui características morfológicas que favorecem a retenção de água, com mecanismos fisiológicos que regulam a abertura dos estômatos para manter um equilíbrio de carbono positivo em condições de escassez hídrica (Morgante et al., 2020).

Conforme a FAO (2019), a mandioca é reconhecida como uma fonte importante de carboidratos com potencial significativo no contexto do agronegócio global, desempenhando um papel crucial na geração de empregos e renda em diversas regiões do mundo, com uma produção estimada em aproximadamente 292 milhões de toneladas. No entanto, no Brasil, a expansão do cultivo de mandioca tem se mantido estável em relação às áreas plantadas. Na região Norte do Brasil, destaca-se como a principal região produtora de mandioca, contribuindo com 20,55% da produção nacional, sendo o estado do Pará o líder nessa produção regional, conforme destacado por Fernandes (2018).

Por outro lado, o açaí é uma planta típica da região Amazônica pertencente à ordem dos Arecales, gênero *Euterpe* da família Arecaceae e recebe o nome científico de *Euterpe spp.*, encontrada principalmente nas áreas de várzeas e planas (Santos et al., 2019). De acordo com Neves et al. (2022), o açaizeiro é altamente adaptável e capaz de reproduzir-se em solos com baixa aeração devido às suas raízes. Essa palmeira absorve os minerais essenciais através do seu amplo sistema radicular que

exploram extensas áreas de solo. Com sua coloração arroxeada, o açazeiro é a variedade mais comum, consumida e resistente a pragas.

O açazeiro é uma palmeira que forma touceiras com até 25 perfilhos durante o desenvolvimento do fruto. As plantas adultas possuem estipes que variam de 3 a 20 metros de altura e 7 a 18 centímetros de diâmetro. Suas folhas são compostas, pinadas, com cerca de 40 a 80 pares de folíolos dispostos em arranjo espiralado. A inflorescência do açazeiro é em forma de cacho, contendo flores estaminadas e pistiladas organizadas em tríades, onde cada flor feminina é cercada por duas flores masculinas. Os frutos do açazeiro são drupas globosas, com diâmetro de 1 a 2 centímetros e peso médio de 1,5 gramas. O epicarpo pode ser roxo ou verde na maturação, enquanto o mesocarpo polposo envolve um endocarpo volumoso e duro que abriga a semente em seu interior (Neri et al., 2018).

A polpa dessa fruta é amplamente consumida por seu elevado valor nutricional e benefícios para a saúde, o que a coloca na categoria de "superfruta", ao lado de frutas como romã, mirtilo e amora (Bonomo et al., 2014). A crescente demanda pelo açaí no mercado tem gerado benefícios significativos para os extrativistas, transportadores e indústrias de pequeno e médio porte. Beneficiando principalmente comunidades de baixa renda em áreas ribeirinhas, uma vez que contribui para o aumento da renda familiar, embora ainda enfrentem desafios financeiros, conforme destacado por Cordeiro et al. (2024) de acordo com os dados do último censo agropecuário a produção brasileira de fruto do açaí em 2017 alcançou 219.885 toneladas, e o Estado do Amazonas totalizou 62.329 toneladas (IBGE, 2017).

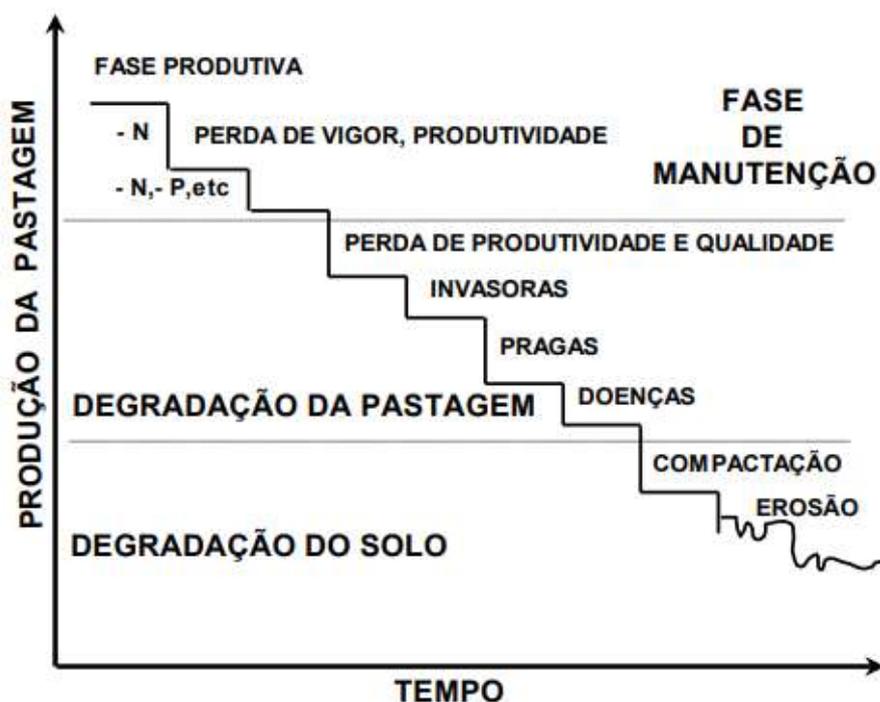
5.4 Conversão de Áreas Florestais em Pastagens

Pastagens ocupam 67% da área destinada à atividade agropecuária em todo o planeta, totalizando 3,2 bilhões de hectares em 2018 (Fao, 2020). No Brasil, os pastos correspondem aproximadamente 162,19 milhões de hectares, equivalente a 21% do território nacional. Apesar de 95% da produção de carne bovina no Brasil ocorrer em sistemas de pecuária, aproximadamente 53% desses ambientes apresentam algum nível de degradação. Como resultado, ocorre diminuição na produção de forragem, capacidade de suporte no desempenho animal na produtividade e, conseqüentemente, uma redução na receita, juntamente com aumento nos custos de produção (MapBiomass, 2022).

Segundo levantamento conduzido pelo MapBiomas (2022), em termos proporcionais, o bioma mais ocupado por pastagens cultivadas é a Mata Atlântica, com 25,7%, seguido por Cerrado (23,7%), Caatinga (23,1%), Pantanal (16%) e Amazônia (13,4%). Por sua vez, os estados brasileiros que concentram maiores áreas de pastagens são Pará (cerca de 21,5 milhões de hectares), Mato Grosso (cerca de 21 milhões de hectares) e Minas Gerais (cerca de 19,3 milhões de hectares). Considerando o período de 1985 a 2020 os biomas Amazônia e Cerrado também obtiveram maior celeridade da expansão da pastagem, por exemplo, no bioma amazônico, este rubro cresceu até em duas vezes. Aproximadamente, 43% das áreas destinadas às pastagens na Amazônia encontrava-se em alto nível de degradação, 41% com níveis moderados e apenas 16% com baixos níveis degradados.

De acordo com Soares Filho et al. (1992) uma pastagem entra em estado de degradação quando ocorre uma redução na produção de forragem em termos de qualidade e quantidade, mesmo em períodos favoráveis ao crescimento. Este processo é caracterizado pela diminuição da cobertura do solo pela vegetação, baixa regeneração natural de plantas, presença de espécies invasoras competindo por recursos, erosão causada pela ação das chuvas e aumento significativo da proporção de espécies invasoras, favorecendo a colonização da pastagem por gramíneas nativas. Os níveis de degradação podem variar dependendo do manejo estabelecido no solo, conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3– Representação gráfica simplificada do processo de degradação de pastagens cultivadas em suas diferentes etapas no tempo (MACEDO, 2000).



Em sistemas de pastagens bem manejados, há melhorias significativas em várias propriedades do solo, como retenção de água, estabilidade dos agregados, teor de matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (Franzluebbers et al., 2011). O manejo do solo desempenha um papel fundamental nesses processos, pois afeta diretamente os SE associados à funcionalidade do solo e aos agroecossistemas (Dominati et al., 2014; Ferrarini et al., 2018). Estudos desenvolvidos por Soares et al. (2016) corroboram acerca da estabilidade de agregados e da densidade do solo em áreas de pastagem em comparação com florestas, evidenciando os benefícios do manejo adequado. Souza Braz et al. (2013) também destacaram um aumento nos estoques de carbono em pastagens com aproximadamente 8 anos de uso, mas alertaram que práticas inadequadas, como o uso frequente do fogo para limpeza, podem reduzir os estoques de carbono, elevar o pH, aumentar a disponibilidade de nutrientes e causar o declínio do Alumínio trocável, prejudicando os serviços ecossistêmicos do solo.

Os SE fornecidos por ecossistemas agrícolas são principalmente voltados para a produção de alimentos, contribuindo para a autossuficiência (Galhena et al., 2013), geração de renda e melhorias no estado nutricional, na diversidade alimentar, na saúde e na segurança alimentar das famílias (Mertz et al., 2005). Contudo, os

agroecossistemas, caracterizados como ecossistemas voltados à produção agrícola ou pecuária, também geram diversos desserviços ecossistêmicos (EDS) (Shackleton et al., 2016), como o surgimento de pragas e ervas daninhas, compactação dos solos, erosão e redução na biodiversidade. Se não forem adequadamente controlados, esses desserviços podem reduzir a produtividade ou a qualidade dos produtos (Zhang et al., 2007), comprometendo os benefícios finais que contribuem para o bem-estar humano.

Figura 4– Efeitos do uso da terra nos serviços ecossistêmicos



Fonte: Adaptado de Costa et al., 2024

Nesse sentido, uma abordagem integrada para compreender o papel da natureza no bem-estar humano é essencial, especialmente ao abordar os conflitos de uso da terra (Figura 4), que comprometem a sustentabilidade ambiental e a produtividade (Blanco et al., 2019). Entre eles, destaca-se a falta de implementação e monitoramento eficazes, que impede a adoção de práticas adequadas para o manejo sustentável do solo. A degradação de pastagens, frequentemente causada pelo sobrepastoreio e compactação do solo, reduz a qualidade e a produtividade das áreas cultiváveis (Costa et al., 2024). Além disso, práticas inadequadas diminuem a capacidade do solo de reter água e controlar a erosão hídrica, agravando problemas

de degradação e perda de serviços ecossistêmicos essenciais, como a manutenção da biodiversidade, a regulação do clima e o controle de enchentes (Vang Rasmussen et al., 2017; Hebinck et al., 2018).

6. MATERIAL E MÉTODOS

6.1 Abordagem da Pesquisa

A oferta de serviços ecossistêmicos relacionados ao solo está diretamente vinculada às suas funções e interações, sendo impactada pelo uso e manejo dos ecossistemas terrestres (Adhikari e Hartemink, 2016). Inicialmente, foram realizadas pesquisas nas plataformas de artigos científicos: *Web of Science*, *Science Direct*, *Pub Med* e *Google Acadêmico*, a fim de identificar trabalhos que estavam sendo publicados sobre a temática. Utilizou-se palavras-chaves em inglês para uma busca mais abrangente: “*Soil Ecosystem Services*” “*Soil Quality Indicators*” “*Organic carbon in soils*” “*Nutrient cycling*” e “*Ecosystem services in Amazonian soils*”. Os resultados dos principais artigos que relacionaram direta ou indiretamente SE com os atributos do solo, foram elencados na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação dos atributos com os serviços ecossistêmicos do solo

Indicador	Atributos do solo	Serviço Ecossistêmico Relacionado	Autores
Físico	Densidade Textura	Compactação do solo, controle da erosão, crescimento das plantas e capacidade em permanecer eretas (Serviço de suporte e regulatório).	Gao et al., 2024; Bag et al., 2022, Dorner et al., 2022; Zárate-Salazar et al., 2024. Giles-Hansen et al., 2020; Lai e Kumar, 2020; Frizzle et al., 2021; Távora et al., 2022, Hyun et al., 2022.
	Umidade gravimétrica Resistência a Penetração Condutividade hidráulica (Ks)	Regulação hídrica, função de armazenamento e infiltração de água (Serviço de regulação).	Li et al., 2020; Sileshi et al., 2020, Sátiro et al., 2021. Enang et al., 2022.
	H+Al, Al ³⁺	Função de mobilização de elementos potencialmente tóxicos e lixiviação de nutrientes (Serviço de regulação).	Chen et al., 2023; Santos-Lesley et al., 2023; Santos-Silva et al., 2024.
	pH	Fornecimento e de retenção de nutrientes, fundamentais para o crescimento das plantas e microorganismos dependentes (Serviços de provisão).	Sena et al., 2020; Moura et al., 2021; Marion et al., 2022; Straffelini et al., 2024. Başkent e Balc, 2024.
Químico	CTC Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , Na ²⁺ N, P e K ⁺ Soma de Bases	Fertilidade do solo, assimilação e sequestro de carbono a longo prazo no solo (Serviço de provisão e regulação).	Nyawira et al., 2021; Zhang et al., 2021; Githongo et al., 2021; Cherubim et al, 2023.
	COS	Regulação da fertilidade do solo, suporte à biodiversidade e funcionamento ecológico (Serviço de regulação).	Demétrio et al., 2024; Nasukawa et al., 2025; North et al., 2025.
	Respiração do solo Macrofauna do solo Abundância e diversidade da fauna do solo		

COS= Carbono orgânico do solo; Ca²⁺= Cálcio; Mg²⁺= Magnésio; K⁺= Potássio e Na²⁺= Sódio. Tabela desenvolvida com base na literatura científica, relacionando aos atributos do solo e os serviços ecossistêmicos prestados, interpretação da autora.

6.1.2 Seleção dos atributos e Relação com os SE

Neste estudo, utilizou-se uma estrutura abrangente, adaptável e objetiva para analisar o solo de maneira multifuncional, permitindo avaliar os efeitos das mudanças no uso da terra sobre seus atributos e a capacidade em fornecer serviços ecossistêmicos. A metodologia baseou-se nos critérios de qualidade do solo propostos por Doran & Parkin (1996) e nos conceitos desenvolvidos por Dominati (2010), Adhikari e Hartemink (2016) e Lal (2016). Com base na literatura científica (Tabela 1), foram avaliados atributos físicos (densidade, teor de argila, umidade gravimétrica) e atributos químicos (pH, CO, CTC, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, P, H+Al e Al³⁺). Os SE avaliados diretamente nesse estudo foram: ciclagem de nutrientes e capacidade do solo em armazenar carbono. De forma indireta: compactação do solo e retenção de água, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 –Seleção dos atributos e Relação com os SE

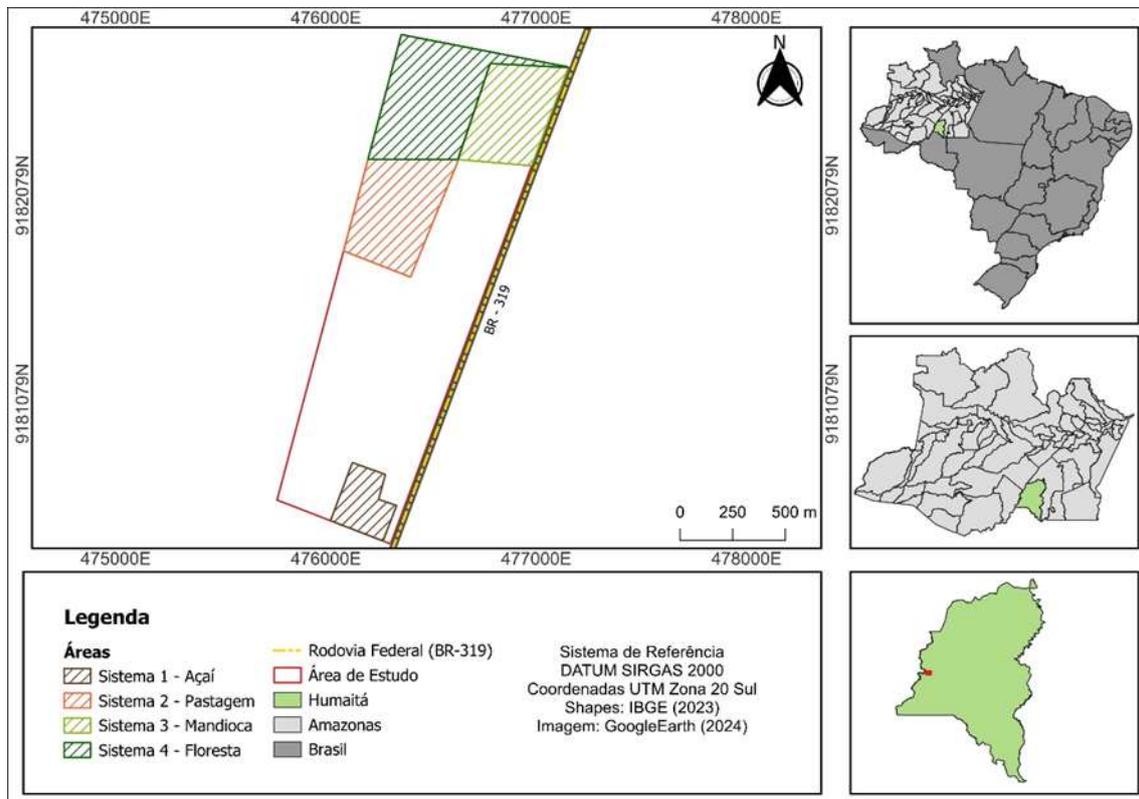
Avaliação	Serviço Ecossistêmico	Atributos do Solo
Direta	Ciclagem de nutrientes	CO, CTC, Ca ²⁺ , K ⁺ , P, pH e densidade do solo
Direta	Capacidade do solo em armazenar carbono	Densidade do solo, teor de argila, umidade gravimétrica
Indireta	Compactação do solo	Teor de argila e umidade gravimétrica e densidade do solo
Indireta	Retenção de água	Teor de argila e umidade gravimétrica e CO

CO=Carbono orgânico; CTC=capacidade de troca catiônica; pH= potencial Hidrogeniônico; Ca²⁺= Cálcio, K⁺= Potássio, P= Fósforo. Tabela desenvolvida pela autora com os conceitos de Dominati (2010); Adhikari e Hartemink (2016) e Hyun et al., 2022.

6.3 Áreas de Estudo

A área de estudo localizou-se nas imediações da BR 319, km 50, sentido Humaitá/AM para Manaus/AM, ao sul do estado do Amazonas na zona de ocorrência conhecida como “arco do desmatamento” (Figura 5). Foram selecionados quatro ambientes: açazal, mandiocal, pastagem e Floresta Natural, o último utilizado como área de referência. Gomes et al. (2016) justifica que analisar atributos físicos, químicos e biológicos do solo em diferentes formas de uso e compará-los com áreas preservadas, livres de interferência humana, possibilita medir a intensidade das alterações resultantes de distintos modelos de exploração. Essa abordagem permite que a Floresta Natural sirva como parâmetro para a construção de um índice geral na avaliação dos SE do solo.

Figura 5 – Mapa de localização aproximado da área de estudo com áreas de açai, pastagem, mandioca e floresta.



Fonte: Autora (2024)

O clima da região, segundo à classificação de Köppen, é do tipo Am, tropical chuvoso (chuvas do tipo monção), apresentando um período seco de pequena duração, com temperaturas variando entre 25 e 27 °C e precipitação média anual de 2.500 mm, com período chuvoso iniciando em outubro e prolongando-se até junho, e umidade relativa do ar entre 85 e 90% (Alvares et al., 2013). Na região predominam os solos de caráter distrófico ou álico, encontrados em extensas áreas cobertas por vegetação de cerrado ou campos (Embrapa, 2018).

Quatro áreas foram escolhidas para o estudo (Tabela 3), incluindo três áreas manejadas (Açaizal, Mandiocal e Pastagem), além de uma área de Floresta Natural, utilizada como área de referência.

Tabela 3 – Descrição de uso e histórico das áreas sob pastagem, açaizal, mandiocal e Floresta Natural na região Sul do Amazonas

Áreas de estudos	Descrição da área
Floresta Natural	A Floresta Tropical Ombrófila Densa é definida por uma vegetação perene, composta predominantemente por árvores altas e densamente aglomeradas, que se organizam em vários estratos, com alturas que variam de 20 a 50 metros (SFB, 2020) (Figura 5).
Cultivo de pastagem	A área de pastagem possui aproximadamente 35 anos de manejo com reforma do pasto. Foram realizadas práticas de calagem, porém sem adubação (Figura 5).
Cultivo de açaí	O sistema de cultivo de açaí <i>Euterpe oleracea</i> , apresenta um manejo de 10 anos com práticas de adubação anual e irrigação regularmente (Figura 5).
Cultivo de mandioca	O ambiente possui 2 anos de cultivo, com prática de gradagem realizada antes do plantio (Figura 5).

Figura 6 – Áreas de estudo: A = área de Floresta Natural; B = área de Mandioca; C= área de Pastagem; D= área de Açaizal



Fonte: Embrapa (2019); Embrapa (2022) e Autora (2024)

6.4 Análises químicas do solo

a) Metodologia de Campo

As coletas foram realizadas entre os meses de novembro e dezembro de 2022. Para os sistemas de cultivos foram demarcados 15 pontos amostrais aleatórios distribuídos nas áreas. Por meio da abertura de pequenas trincheiras (Figura 7), nas camadas de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm foram coletadas amostras deformadas em forma de torrão, acondicionadas em sacos plásticos identificados (Figura 7). Em cada ponto coletou-se solos nas profundidades de 0-5 cm e 5-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm, perfazendo um total de 60 amostras por área, totalizando 240 amostras. Complementarmente, realizou-se coletas em forma de anel volumétrico (Figura 7), para avaliação dos atributos físicos e carbono orgânico do solo.

Figura 7– Metodologia de campo: A = abertura de pequenas trincheiras; B = amostras em sacos plásticos; C = amostras em anéis volumétricos.



Fonte: Autora (2024)

b) Análise de Laboratório

Às amostras foram levadas ao Laboratório de Pedobiologia do Instituto de Educação Agricultura e Ambiente (IEAA-UFAM), secas ao ar e em seguida passadas em peneira de 2,0 mm para análise química do solo. Foram realizadas determinações do pH do solo (água) fósforo disponível (mg kg^{-1}), cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+}) e acidez potencial. Com base nos resultados das análises químicas, foram calculadas a soma de bases (SB), CTC potencial (T), CTC efetiva (t), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%) segundo a metodologia proposta por Teixeira et al. (2017).

O pH em água foi medido por meio de um potenciômetro, utilizando-se a relação solo: água, na proporção de 1:2,5 (m/v). O Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} foram extraídos utilizando uma solução de KCl 1 mol L^{-1} . A quantificação do Al^{3+} foi realizada por titulometria, utilizando NaOH $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ como titulante e azul de bromotimol como indicador. Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram analisados por espectrometria de absorção atômica. A acidez potencial foi extraída utilizando acetato de cálcio tamponado a pH 7,0 e determinada por titulometria com NaOH $0,025 \text{ mol L}^{-1}$, utilizando fenolftaleína como indicador. O K^{+} e o P foram extraídos pelo método *Mehlich-1*. Os teores de P foram mensurados por espectrofotometria UV-Vis, enquanto os de K^{+} foram analisados por espectrofotometria de chama.

c) Carbono Orgânico Total

Amostras de solo de TFSA (terra fina seca ao ar) foram peneiradas através de uma malha de 0,18 mm, após isso trituradas usando um almofariz. A determinação do teor de carbono orgânico foi realizada através do volume de dicromato de potássio durante a oxidação da matéria orgânica. Esse consumo é obtido pela diferença entre o volume de dicromato de potássio utilizado na prova em branco e o volume utilizado na titulação da amostra junto com a solução de sulfato ferroso amoniacal (Teixeira et al., 2017).

6. 5 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. (2017).

a) Densidade e Umidade gravimétrica

As amostras coletadas em anéis volumétricos (Figura 8) foram saturadas por capilaridade até aproximadamente dois terços da altura do anel, utilizando uma lâmina de água em uma bandeja plástica. Após a saturação, as amostras foram pesadas e, em seguida, levadas à estufa a 105 °C para a determinação da umidade gravimétrica (U_g) e da densidade do solo (D_s), pelo método do anel volumétrico.

Figura 8 – Análise de densidade: A = Amostras na mesa de tensão; B = amostras na bandeja plástica.



Fonte: Autora (2024)

b) Análise granulométrica

A fração de argila foi determinada utilizando o *Método da Pipeta*. A suspensão do solo foi agitada lentamente por 16 horas em um agitador mecânico do tipo Wagner, ajustado para cerca de 50 rpm, após a adição de um dispersante químico (NaOH 0,1 N). Após o período de agitação, um volume de 25 ml da suspensão foi coletado com uma pipeta. Essa amostra foi então seca em estufa a 105 °C, por 24 horas e posteriormente pesada para determinar a fração de argila (Teixeira et al., 2017).

6.5 Análise Estatística

Os dados resultantes das análises laboratoriais foram inicialmente submetidos à análise estatística descritiva e análise multivariada. Posteriormente, analisados quanto a homogeneidade e normalidade pelos testes de Levene e Kolmorov-Smirnov. Quando pertinente submetidos a análise de variância pelo teste F a 5% de probabilidade, com teste de Tukey a 5% de probabilidade como teste *post hoc*. Todas essas análises foram realizadas utilizando o ambiente estatístico R e RStudio versão 4.4.1 (R Core Team, 2024).

7. RESULTADOS

7.1 Estatística Descritiva dos Indicadores Químicos do Solo

Na Tabela 4 são apresentados os resultados das análises de pH, Al³⁺ e acidez potencial, dos sistemas de uso da terra (LUS) em diferentes profundidades. Quanto ao pH, observa-se que, em todas as camadas, os ambientes deste estudo apresentam pH de caráter ácido, inferior a 5, exceto o sistema de pastagem, onde os valores de pH variam entre 5,35 e 5,48 em diferentes profundidades. O pH do sistema Floresta Natural (pH = 3,98) é o mais ácido e difere significativamente dos outros sistemas. O ambiente de açaí apresentou uma diferença significativa ($P < 0,05$) com aumento de 16% em relação à Floresta Natural na camada de 0 a 5 cm. Essa diferença percentual diminuiu conforme o aumento da profundidade do solo, sendo de 15% na camada de 5 a 10 cm, 14% na camada de 10 a 20 cm e 11% na camada de 20 a 40 cm.

Houve relação significativa de Al³⁺ com os sistemas de açaizal (Al³⁺ = 2,95 a 4,75 cmol_c kg⁻¹) e pastagem (Al³⁺ = 1,92 a 2,17 cmol_c kg⁻¹) em todas as camadas,

referente à Floresta Natural ($Al^{+3} = 4,53$ a $4,75 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Destaca-se uma redução de 75% do teor de alumínio no sistema pastagem, na camada 0–5 cm, e nas demais profundidades uma variação entre 52% e 59% para essa variável em comparação com a Floresta Natural. O sistema açazal, por sua vez, manteve um percentual de redução balanceado em todas as camadas, isto é, com variações de 34% a 35%, aproximadamente, comparado à área de referência. O sistema mandiocal apresenta concentrações de Alumínio significativamente maiores do que as áreas de Floresta Natural em todas as camadas, o maior aumento foi observado na profundidade superficial 158% ($Al^{+3} = 3,10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) em relação a Floresta Natural ($Al^{+3} = 1,20 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$).

Ao analisar o atributo de acidez potencial (H+Al), pode-se inferir que a pastagem (H+Al = $10,37 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) apresentou os maiores valores em todas as profundidades, relacionando-se significativamente com o sistema açazal nas camadas 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm e com diferença significativa com a Floresta Natural (H+Al = $5,49 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), que apresentou menores teores, consecutivamente. As concentrações de H+Al no sistema de mandiocal não diferiram significativamente das áreas de Floresta Natural em nenhuma profundidade analisada, com aumentos percentuais moderados que variaram de 3.5% a 11.4%, variando de acordo com a profundidade.

Tabela 4 – Teste de médias para pH em água, acidez potencial e Alumínio trocável, sob diferentes sistemas de uso da terra.

Sistema de uso	Prof.	pH	Al ³⁺	H+Al
Floresta Natural	0-5 cm	3,98 ± 0,03c	4,75 ± 0,21 ^a	10,37 ± 0,28a
Açaí		4,65 ± 0,08b	3,10 ± 0,14b	7,69 ± 0,18c
Mandioca		4,41 ± 0,08b	4,33 ± 0,28 ^a	9,05 ± 0,36b
Pastagem		5,48 ± 0,08a	1,20 ± 0,14c	7,43 ± 0,19c
Floresta Natural	5-10 cm	4,12 ± 0,04c	4,75 ± 0,28 ^a	9,17 ± 0,29a
Açaí		4,75 ± 0,09b	3,07 ± 0,14b	6,93 ± 0,14b
Mandioca		4,52 ± 0,07b	4,86 ± 0,15 ^a	8,32 ± 0,32a
Pastagem		5,40 ± 0,06a	1,94 ± 0,17c	6,22 ± 0,13b
Floresta Natural	10-20 cm	4,28 ± 0,05c	4,60 ± 0,30 ^a	8,35 ± 0,28a
Açaí		4,88 ± 0,04b	2,97 ± 0,13b	6,32 ± 0,12b
Mandioca		4,49 ± 0,08c	4,93 ± 0,17 ^a	8,01 ± 0,30a
Pastagem		5,40 ± 0,05a	2,17 ± 0,13c	5,67 ± 0,07b
Floresta Natural	20-40 cm	4,45 ± 0,10c	4,53 ± 0,30 ^a	7,87 ± 0,21a
Açaí		4,98 ± 0,04b	2,95 ± 0,09b	6,06 ± 0,09b
Mandioca		4,68 ± 0,08c	5,07 ± 0,19 ^a	6,06 ± 0,09b
Pastagem		5,35 ± 0,05a	2,05 ± 0,16c	5,49 ± 0,11b

Prof. = profundidade da camada; pH= potencial Hidrogeniônico; Al³⁺ = Alumínio (cmol_c kg⁻¹); H+Al= acidez potencial (cmol_c kg⁻¹). Letras diferentes significa diferenças significativas entre as camadas por sistema de uso de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância ($P < 0,05$). Média ± SE, $n = 15$.

Na tabela 5 são apresentados os valores de Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺, P e CO. Referente aos teores de Mg²⁺, nos quatro sistemas de uso da terra, a maior concentração do nutriente foi encontrada no ambiente pastagem (Mg²⁺ = 0,27 cmol_c kg⁻¹) na profundidade 5-10 cm, sendo aproximadamente duas vezes maior que os teores encontrados na Floresta Natural (Mg²⁺ = 0,10 cmol_c kg⁻¹). No sistema mandiocal, nas camadas de 0-5 cm e 20-40 cm, não houve diferença significativa ($P \geq 0,05$) quando comparados à Floresta Natural. Enquanto o ambiente açaizal apresentou valores semelhantes aos da pastagem nas camadas mais profundas (Mg²⁺ = 0,14 cmol_c kg⁻¹), observou-se diferenças significativas ($P < 0,05$) em relação à Floresta Natural nas duas primeiras camadas com aumento de 114 a 100%, respectivamente, nas profundidades 0-5 cm e 5-10 cm.

Tabela 5 – Teste de médias para Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺, P e CO sob diferentes sistemas de uso da terra.

Sistema de uso	Prof.	CO	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
Floresta Natural	0-5 cm	11.50 ± 0.72c	0.02 ± 0.00b	0.17 ± 0.03b	0.10 ± 0.01c	0.07 ± 0.01c
Açaizal		18.59 ± 1.30ab	0.06 ± 0.01aa	0.26 ± 0.01b	0.20 ± 0.02ab	0.14 ± 0.01ab
Mandiocal		14.54 ± 0.99bc	0.03 ± 0.00ab	0.21 ± 0.01b	0.14 ± 0.01bc	0.13 ± 0.01bc
Pastagem		19.74 ± 1.27a	0.06 ± 0.02a	0.65 ± 0.10a	0.27 ± 0.04a	0.21 ± 0.03a
Floresta Natural	5-10 cm	7.57 ± 0.72b	0.02 ± 0.00a	0.26 ± 0.01a	0.07 ± 0.01c	0.06 ± 0.01b
Açaizal		8.63 ± 0.64b	0.05 ± 0.02a	0.42 ± 0.10a	0.15 ± 0.03b	0.10 ± 0.02ab
Mandiocal		8.08 ± 0.67b	0.02 ± 0.00a	0.36 ± 0.03a	0.12 ± 0.01bc	0.09 ± 0.01ab
Pastagem		11.87 ± 0.86a	0.39 ± 0.25	0.81 ± 0.28a	0.22 ± 0.01a	0.12 ± 0.01a
Floresta Natural	10-20 cm	5.26 ± 0.43b	0.02 ± 0.00a	0.17 ± 0.03a	0.07 ± 0.01b	0.07 ± 0.01b
Açaizal		5.48 ± 0.47a	0.04 ± 0.01a	0.24 ± 0.00a	0.14 ± 0.01ab	0.11 ± 0.01ab
Mandiocal		3.88 ± 0.37b	0.02 ± 0.01a	0.22 ± 0.01a	0.12 ± 0.01b	0.07 ± 0.01b
Pastagem		6.81 ± 0.46a	0.04 ± 0.01a	0.26 ± 0.10a	0.18 ± 0.02a	0.13 ± 0.02a
Floresta Natural	20-40 cm	3.82 ± 0.22b	0.01 ± 0.00a	0.21 ± 0.04a	0.12 ± 0.01b	0.06 ± 0.01b
Açaizal		5.48 ± 0.47a	0.04 ± 0.01a	0.24 ± 0.00a	0.14 ± 0.01ab	0.11 ± 0.01ab
Mandiocal		3.88 ± 0.37b	0.02 ± 0.01a	0.22 ± 0.01a	0.12 ± 0.01b	0.07 ± 0.01b
Pastagem		6.81 ± 0.46a	0.04 ± 0.01a	0.26 ± 0.10a	0.18 ± 0.02a	0.13 ± 0.02a

Prof. = profundidade da camada; CO = carbono orgânico (g kg⁻¹); P = Fósforo disponível (cmol_c kg⁻¹); Ca²⁺ = teor de cálcio (cmol_c kg⁻¹); Mg²⁺ = teor de magnésio (cmol_c kg⁻¹); K⁺ = teor de potássio (cmol_c kg⁻¹). Letras diferentes significa diferenças significativas entre as camadas por sistema de uso de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância ($P < 0.05$). Média ± SE, $n = 15$.

Os valores médios das interações entre sistema de manejo e profundidade apresentaram maiores concentrações de Ca²⁺ nos sistemas de pastagem (Ca²⁺ = 0,65 cmol_c kg⁻¹) com valores aproximadamente 3 vezes maiores que a Floresta Natural (Ca²⁺ = 0,17 cmol_c kg⁻¹), conforme evidenciado na Tabela 4. Na camada 5-10 observou-se a maior concentração de Ca²⁺ para o sistema de pastagem (Ca²⁺ = 0,81 cmol_c kg⁻¹), correspondendo ao aumento de 211% em relação a Floresta Natural (Ca²⁺ = 0,26 cmol_c kg⁻¹), apesar desses valores representarem um aumento de duas vezes mais que os teores encontrados na Floresta Natural não houve diferença significativa entre os sistemas, assim como os demais sistemas de uso apresentaram semelhanças significativas entre si ($P \geq 0,05$).

Ao analisar os resultados de Potássio (K⁺) nos diferentes sistemas de uso da terra, observou-se que o sistema de Pastagem apresentou maiores níveis desse nutriente em todas as profundidades, havendo um decréscimo conforme o aumento das camadas. Os sistemas de açaí, mandioca e Floresta Natural, apresentaram semelhanças entre si ($P \geq 0,05$).

Os resultados obtidos demonstram variações significativas nos valores de CO entre diferentes sistemas de uso do solo. O sistema de pastagem apresentou, consistentemente, os maiores valores de CO nas profundidades avaliadas, seguido

pelo sistema de açazal, mandiocal e Floresta Natural. Na profundidade 0-5 cm, o valor de COT para a pastagem ($19,74 \text{ g kg}^{-1}$) sendo 71,65% maior em relação à Floresta Natural ($11,50 \text{ g kg}^{-1}$). O sistema de açazal também apresentou um aumento expressivo, com 61,65% a mais que a Floresta Natural. Resultados semelhantes foram observados em demais profundidades. Na profundidade 5-10 cm, o CO da pastagem ($11,87 \text{ g kg}^{-1}$) foi 56,80% superior, enquanto o açazal apresentou um aumento de 14,0%. Já na profundidade 10-20 cm, os aumentos foram de 29,47% para a pastagem e 4,18% para o sistema açazal.

Na Tabela 6, observa-se os valores de soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica efetiva (t), capacidade de troca catiônica potencial (T), saturação por base (V%) e saturação por alumínio (m%). Quando analisados os valores de SB, foi possível observar que o sistema de pastagem ($\text{SB} = 1,07 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) apresentou maiores níveis em todas as profundidades sendo significativamente maior que a Floresta Natural ($\text{SB} = 0,48 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), que corresponde a um aumento de 1,5 vezes em relação a Floresta Natural. Os demais sistemas de uso apresentaram semelhanças entre si nas duas primeiras camadas e somente na camada 10-20 cm diferença com a Floresta Natural.

Quanto aos resultados de capacidade de troca catiônica efetiva (t), os sistemas açai ($4,94 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e pastagem ($5,93 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) apresentaram os maiores valores em todas as camadas, sendo semelhantes entre si ($P \geq 0,05$), resultados similares foram encontrados em T para os ambientes supracitados. A Floresta Natural na análise da acidez trocável (t), diferenciou-se estatisticamente de todos os sistemas com menores valores em todas as profundidades, por outro lado, analisando a acidez potencial (T), observou-se semelhança significativa entre a Floresta Natural e o ambiente mandiocal em todas as profundidades ($P \geq 0,05$). Os sistemas de açai e pastagem apresentaram variações médias entre 18% e 49% em relação ao ambiente Floresta natural.

Os valores de saturação por bases (V), demonstraram que o sistema de pastagem apresentou valores maiores em todas as camadas. A Floresta Natural apresentou níveis de saturação por base consistentemente menores, variando de 4,38 a 4,88%. Os valores para o sistema açazal foram geralmente superiores à Floresta Natural, mas variaram entre as camadas. Na camada 0-5 cm, o valor foi 6,00%,

enquanto na camada 5-10 cm aumentou para 9,45%. As últimas profundidades obtiveram valores semelhantes de 7,68%.

Tabela 6 – Teste de médias para soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica efetiva (t), capacidade de troca catiônica potencial (T), saturação por base (V) e saturação por alumínio (m) sob diferentes sistemas de uso da terra.

Sistema de uso	Prof.	SB	t	T	V	m
Floresta Natural	0-5 cm	0.48 ± 0.03b	2.20 ± 0.14c	8.17 ± 0.16c	4.70 ± 0.23b	52.88 ± 5.03b
Açaizal		0.57 ± 0.05b	4.90 ± 0.25a	9.62 ± 0.37b	6.00 ± 0.55b	87.02 ± 2.36a
Mandiocal		0.51 ± 0.02b	3.58 ± 0.15b	8.42 ± 0.23c	5.97 ± 0.39b	86.50 ± 0.66a
Pastagem		1.00 ± 0.10a	5.26 ± 0.21a	10.88 ± 0.28a	11.71 ± 1.13a	90.13 ± 0.59a
Floresta Natural	5-10 cm	0.42 ± 0.02b	2.60 ± 0.14c	6.88 ± 0.15b	4.38 ± 0.16b	74.10 ± 3.77c
Açaizal		0.66 ± 0.11ab	5.17 ± 0.28a	9.39 ± 0.35a	9.45 ± 1.37ab	83.70 ± 3.45ab
Mandiocal		0.64 ± 0.03ab	3.71 ± 0.14b	7.57 ± 0.15b	8.45 ± 0.42ab	82.60 ± 0.96ab
Pastagem		1.07 ± 0.27a	5.93 ± 0.27a	9.58 ± 0.29a	10.89 ± 2.51a	91.60 ± 0.57a
Floresta Natural	10-20 cm	0.38 ± 0.01b	2.73 ± 0.13c	6.23 ± 0.07b	4.42 ± 0.17b	79.17 ± 1.72c
Açaizal		0.48 ± 0.04a	4.94 ± 0.30a	8.29 ± 0.22a	7.68 ± 0.41a	91.37 ± 0.36a
Mandiocal		0.45 ± 0.10a	3.46 ± 0.08b	6.56 ± 0.10b	5.01 ± 0.16b	85.30 ± 0.89ab
Pastagem		0.50 ± 0.03a	5.51 ± 0.21a	8.91 ± 0.31a	8.05 ± 0.59a	92.11 ± 1.48a
Floresta Natural	20-40 cm	0.41 ± 0.01a	2.53 ± 0.16c	5.97 ± 0.11b	4.88 ± 0.81b	78.68 ± 3.28b
Açaizal		0.48 ± 0.04a	4.94 ± 0.30a	8.29 ± 0.22a	7.68 ± 0.41a	91.37 ± 0.36a
Mandiocal		0.45 ± 0.10a	3.46 ± 0.08b	6.56 ± 0.10b	5.01 ± 0.16b	85.30 ± 0.89ab
Pastagem		0.50 ± 0.03a	5.51 ± 0.21a	8.91 ± 0.31a	8.05 ± 0.59a	92.11 ± 1.48a

Prof. = profundidade da camada; SB = soma de base (cmol_c kg⁻¹); T = capacidade de troca catiônica potencial (cmol_c kg⁻¹); t = capacidade de troca catiônica efetiva (cmol_c kg⁻¹); V= saturação por base (%); m= saturação por alumínio (%). Letras diferentes significa diferenças significativas entre as camadas por sistema de uso de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância ($P < 0.05$). Média ± SE, $n=15$.

As análises de saturação por alumínio (m) evidenciaram que a Floresta Natural (52,88%) apresentou menores valores e diferenciou-se estatisticamente de todas os sistemas de uso. Houve similaridade entre os sistemas açaí e mandioca em todas as camadas. A área de pastagem apresentou menores teores (entre 25 e 45%) e, conseqüentemente, foi o ambiente que mais reduziu em até 69% em relação a área de referência. O sistema de açaizal foi responsável por reduzir entre 28% e 34% quando comparado com a Floresta Natural, e mandiocal com valores similares reduziu entre 35 e 38%, aproximadamente.

7.2 Estatística Descritiva dos Indicadores Físicos do Solo

Na Tabela 7 foram reportados os valores de densidade, argila e umidade gravimétrica para todos os sistemas de uso da terra em diferentes profundidades.

Quanto à densidade do solo, observa-se que na camada 5-10 cm não houve diferença significativa entre os sistemas de uso. Na camada mais superficial somente o Sistema açazal ($D_s = 1,27 \text{ g cm}^{-3}$) e Floresta Natural ($D_s = 1,25 \text{ g cm}^{-3}$) apresentaram diferenças significativas. O sistema açazal e mandiocal na camada 10-20 cm apresentaram variações estatísticas significativas, respectivamente, com aumentos de 8% e 10%, aproximadamente, em relação a Floresta Natural. Na última profundidade os sistemas de uso apresentaram variações significativas sendo a área de Floresta Natural com menor valor de densidade ($D_s = 1,11 \text{ g cm}^{-3}$), sistema açazal ($D_s = 1,22 \text{ g cm}^{-3}$), sistema mandiocal ($D_s = 1,23 \text{ g cm}^{-3}$) e sistema de pastagem ($D_s = 1,29 \text{ g cm}^{-3}$), configurando um aumento aproximado de 9%, 10% e 16% dos referidos sistemas, respectivamente.

Tabela 7 – Atributos físicos do solo sob quatro sistemas de uso em diferentes camadas

Sistema de uso	Prof.	Ug	Ds	Argila
Floresta Natural	0-5 cm	1,11 ± 0,06b	1,11 ± 0,06b	292.27 ± 21.94a
Açaí		1,25 ± 0,05b	1,25 ± 0,05b	313.96 ± 20.10a
Mandioca		1,20 ± 0,03b	1,20 ± 0,03b	313.01 ± 11.39a
Pastagem		1,50 ± 0,07a	1,50 ± 0,07 ^a	349.04 ± 17.45a
Floresta Natural	5-10 cm	1,22 ± 0,03a	1,22 ± 0,03 ^a	286.18 ± 22.70b
Açaí		1,27 ± 0,05a	1,27 ± 0,05 ^a	336.52 ± 15.88ab
Mandioca		1,30 ± 0,04a	1,30 ± 0,04 ^a	333.94 ± 16.10ab
Pastagem		1,32 ± 0,08a	1,32 ± 0,08 ^a	350.50 ± 9.03 ^a
Floresta Natural	10-20 cm	1,23 ± 0,05c	1,23 ± 0,05c	281.95 ± 24.67b
Açaí		1,42 ± 0,03ab	1,42 ± 0,03ab	334.37 ± 13.66ab
Mandioca		1,33 ± 0,04c	1,33 ± 0,04c	295.95 ± 10.39b
Pastagem		1,54 ± 0,04a	1,54 ± 0,04 ^a	353.86 ± 17.41a
Floresta Natural	20-40 cm	1,29 ± 0,04c	1,29 ± 0,04c	282.66 ± 14.89b
Açaí		1,44 ± 0,03ab	1,44 ± 0,03ab	334.37 ± 13.66ab
Mandioca		1,44 ± 0,03ab	1,44 ± 0,03ab	295.95 ± 10.39b
Pastagem		1,55 ± 0,03a	1,55 ± 0,03 ^a	353.86 ± 17.41a

Prof. = profundidade da camada; UV = umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); Ds = densidade (g cm^{-3}). Letras diferentes significa diferenças significativas entre as camadas por sistema de uso de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância ($P < 0.05$). Média ± SE, $n = 15$.

A Umidade gravimétrica (Ug) na camada 10-20 cm e 20-40 cm foi similar para os diferentes sistemas de uso, destacando-se os sistemas de mandioca ($U_g = 1,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e pastagem ($U_g = 1,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) com os maiores valores registrados para esta variável. Na profundidade mais superficial somente o sistema açazal ($U_g = 1,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e pastagem ($U_g = 1,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) apresentaram diferenças significativas em comparação com a área de Floresta Natural ($U_g = 1,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), com aumento de 12% e 35% na densidade do solo, respectivamente. Na profundidade 5-10 cm, o sistema

açazal ($U_g = 1,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e mandiocal ($U_g = 1,54 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) apresentaram diferenças significativas com área de Floresta Natural ($U_g = 1,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), com aumento de 4% e 6% respectivamente. O sistema de pastagem, no entanto, apesar de apresentar um aumento de 8% sob a Floresta Natural, não houve diferenças estatísticas significativas.

A Floresta Natural, apresentou os menores teores de argila entre os sistemas desenvolvidos, variando de $281,95 \text{ g kg}^{-1}$ a $292,27 \text{ g kg}^{-1}$. A pastagem apresentou os maiores valores em todos os perfis, com variações de $349,04$ (camada 0-5 cm) até $353,86$ (camada 10-20 cm e 20-40 cm). Observou-se um aumento entre 19% e 25% no ambiente de pastagem em relação a floresta natural.

7.3 Correlação de Pearson

As interações entre os atributos físicos e químicos do solo do sistema Floresta Natural são apresentados na Tabela 8. Houve correlação negativa significativa entre pH e CO ($r = -0,53$, $P < 0,01$), Cálcio e Potássio, apresentaram resultados negativos com pH ($r = -0,36$ e $r = -0,38$, $P < 0,01$, respectivamente). O CO apresentou relação significativa positiva com K^+ ($r = 0,77$, $P < 0,001$), SB (soma de bases, $r = 0,60$, $P < 0,001$), H+Al ($r = 0,85$, $P < 0,001$) e T ($r = 0,86$, $P < 0,001$). Ca^{2+} e Mg^{2+} apresentaram comportamentos semelhantes com correlação significativa positiva para saturação por base e negativa para saturação por alumínio. O teor de K^+ ($r = 0,66$ e $0,68$, $P < 0,001$, respectivamente) e SB ($r = 0,46$ e $0,51$, $P < 0,001$, respectivamente) correlacionaram-se positivamente com H+Al e T, e, correlação inversamente proporcional com m. A acidez potencial (H+Al) e T correlacionaram negativamente com saturação por alumínio (m) com valores de 39% e 34%, respectivamente ($P < 0,01$). Assim como os demais sistemas de uso a densidade correlacionou-se negativamente com umidade gravimétrica em 78% ($r = -0,78$, $P < 0,001$).

Tabela 8 – Coeficiente de correlação de Pearson para a Floresta Natural

Var	pH	CO	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Sb	Al ³⁺	H+Al	t	T	V	m	Argila	ds	ug
pH	1															
CO	-0.53***	1														
P	-0.09n.s.	-0.01n.s.	1													
Ca ²⁺	-0.36**	0.34**	0.04n.s.	1												
Mg ²⁺	-0.10n.s.	0.02n.s.	0.00n.s.	0.14n.s.	1											
K ⁺	-0.38**	0.77***	0.01n.s.	0.22n.s.	0.10n.s.	1										
Sb	-0.41**	0.60***	0.03n.s.	0.56***	0.65***	0.74***	1									
Al ³⁺	-0.31*	0.03n.s.	0.02n.s.	0.01n.s.	0.15n.s.	0.02n.s.	0.10n.s.	1								
H+Al	-0.63***	0.85***	-0.03n.s.	0.22n.s.	-0.02n.s.	0.66***	0.46***	0.15n.s.	1							
t	-0.34**	0.08n.s.	0.02n.s.	0.05n.s.	0.20n.s.	0.08n.s.	0.17n.s.	1.00***	0.18n.s.	1						
T	-0.64***	0.86***	-0.03n.s.	0.25n.s.	0.01n.s.	0.68***	0.51***	0.15n.s.	1.00***	0.19n.s.	1					
V	0.14n.s.	-0.13n.s.	0.05n.s.	0.39**	0.71***	0.18n.s.	0.63***	-0.02n.s.	-0.39**	0.03n.s.	-0.34**	1				
M	0.02n.s.	-0.39**	0.02n.s.	-0.39**	-0.32*	-0.48***	-0.60***	0.71***	-0.19n.s.	0.66***	-0.22n.s.	-0.44***	1			
Argila	-0.18n.s.	-0.01n.s.	-0.04n.s.	0.07n.s.	0.29*	0.10n.s.	0.24n.s.	0.25n.s.	0.07n.s.	0.26*	0.08n.s.	0.21n.s.	0.01n.s.	1		
Ds	0.29*	-0.42***	0.01n.s.	-0.11n.s.	-0.14n.s.	-0.33**	-0.32*	0.02n.s.	-0.31*	0.00n.s.	-0.321*	-0.04n.s.	0.32*	-0.00n.s.	1	
Ug	-0.24n.s.	0.38**	0.00n.s.	0.11n.s.	0.17n.s.	0.29*	0.30*	-0.02n.s.	0.27*	0.00n.s.	0.28*	0.05n.s.	-0.30*	-0.08n.s.	-0.78***	1

Var= variável; pH= Potencial Hidrogeniônico; CO= Carbono orgânico (g kg⁻¹); Ca²⁺= Cálcio (cmol_c kg⁻¹); Mg²⁺= Magnésio (cmol_c kg⁻¹); K+= Potássio (cmol_c kg⁻¹); Sb= Soma de base (cmol_c kg⁻¹); Al³⁺= Alumínio (cmol_c kg⁻¹); H+Al= acidez potencial (cmol_c kg⁻¹); t= capacidade de troca catiônica efetiva (cmol_c kg⁻¹); T= capacidade de troca catiônica potencial (cmol_c kg⁻¹); V= saturação por base; m= saturação por alumínio; ds= densidade (g cm³); ug= umidade gravimétrica (m³ m⁻³) ***P<0.001, **P<0.01, e *P<0.05.

As interações entre os atributos físicos e químicos para o sistema açazal são apresentados na Tabela 9. Observa-se que, o pH apresentou correlação significativa negativa com carbono orgânico, capacidade de troca catiônica potencial, acidez potencial e positiva com densidade. Uma correlação significativa de 44% foi observada entre o pH e CO, indicando uma correlação negativa alta ($r = -0,44$, $P < 0,001$), com H+Al e T, a correlação inversa foi mais expressiva, atingindo 54% ($r = -0,54$, $P < 0,001$) e 55% ($r = -0,55$; $P < 0,001$), respectivamente. Por outro lado, a densidade relacionou-se positivamente com o pH atingindo 28% ($r = 0,28$; $P < 0,05$). O CO apresentou correlação positiva elevada com H+Al e T ($r = 0,81$; $P < 0,001$) e negativa com densidade ($r = -0,57$; $P < 0,001$).

O Fósforo obteve relação significativa apenas com Potássio. As variáveis Ca^{2+} e Mg^{2+} tiveram correlação positiva com K^+ e V, e negativa com m ($P < 0,001$). Foram observadas correlações altas de 90% entre SB e V, Al^{3+} com t e argila de 97% e 54%, respectivamente ($P < 0,05$). Houve um aumento no teor de T à medida que os níveis de H+Al aumentavam de 99%, indicando correlação positiva alta ($r = 0,99$; $P < 0,001$). A densidade, por outro lado apresentou correlações inversas com H+Al ($r = -0,49$, $P < 0,05$), argila ($r = 0,28$, $P < 0,05$) e T ($r = 0,50$, $P < 0,05$).

Tabela 9 – Coeficiente de correlação de Pearson para o sistema açazal

Var	pH	CO	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Sb	Al ³⁺	H+Al	t	T	V	m	Argila	ds	ug
pH	1															
CO	-0.44***	1														
P	0.14n.s.	-0.14n.s.	1													
Ca ²⁺	-0.11n.s.	0.08n.s.	-0.08n.s.	1												
Mg ²⁺	-0.10n.s.	0.07n.s.	0.02n.s.	0.19n.s.	1											
K ⁺	0.09n.s.	-0.18n.s.	0.55***	-0.20n.s.	0.10n.s.	1										
Sb	-0.10n.s.	0.04n.s.	0.14n.s.	0.72***	0.74***	0.25n.s.	1									
Al ³⁺	-0.01n.s.	-0.15n.s.	-0.11n.s.	0.02n.s.	-0.03n.s.	-0.01n.s.	-0.01n.s.	1								
H+Al	-0.54***	0.81***	-0.04n.s.	0.07n.s.	-0.02n.s.	-0.20n.s.	-0.03n.s.	-0.10n.s.	1							
t	-0.03n.s.	-0.13n.s.	-0.07n.s.	0.20n.s.	0.15n.s.	0.05n.s.	0.24n.s.	0.97***	-0.10n.s.	1						
T	-0.55***	0.81***	-0.02n.s.	0.17n.s.	0.09n.s.	-0.16n.s.	0.12n.s.	-0.10n.s.	0.99***	-0.07n.s.	1					
V	0.15n.s.	-0.30*	0.12n.s.	0.59***	0.68***	0.31*	0.90***	0.01n.s.	-0.46***	0.23n.s.	-0.32*	1				
M	0.10n.s.	-0.09n.s.	-0.17n.s.	-0.55***	-0.68***	-0.19n.s.	-0.83***	0.54***	0.00n.s.	0.32*	-0.12n.s.	-0.74***	1			
Argila	0.11n.s.	-0.02n.s.	0.19n.s.	0.14n.s.	-0.10n.s.	0.20n.s.	0.11n.s.	0.07n.s.	-0.10n.s.	0.09n.s.	-0.09n.s.	0.11n.s.	-0.02n.s.	1		
Ds	0.28*	-0.57***	0.03n.s.	-0.15n.s.	0.03n.s.	-0.00n.s.	-0.08n.s.	0.09n.s.	-0.49***	0.06n.s.	-0.50***	0.14n.s.	0.09n.s.	-0.28*	1	
Ug	0.18n.s.	-0.00n.s.	-0.15n.s.	0.09n.s.	-0.24n.s.	-0.20n.s.	-0.14n.s.	0.09n.s.	0.03n.s.	0.05n.s.	0.01n.s.	-0.14n.s.	0.16n.s.	-0.07n.s.	-0.28*	1

Var= variável; pH= Potencial Hidrogeniônico; CO= Carbono orgânico (g kg⁻¹); Ca²⁺= Cálcio (cmol_c kg⁻¹); Mg²⁺= Magnésio (cmol_c kg⁻¹); K+= Potássio (cmol_c kg⁻¹); Sb= Soma de base (cmol_c kg⁻¹); Al³⁺= Alumínio (cmol_c kg⁻¹); H+Al= acidez potencial (cmol_c kg⁻¹); t= capacidade de troca catiônica efetiva (cmol_c kg⁻¹); T= capacidade de troca catiônica potencial (cmol_c kg⁻¹); V= saturação por base; m= saturação por alumínio; ds= densidade (g cm³); ug= umidade gravimétrica (m³ m⁻³) ***P<0.001, **P<0.01, e *P<0.05.

A Tabela 10 exibe os coeficientes de correlação de Pearson do sistema de mandioca, no Sul do Amazonas. O pH apresentou correlação negativa significativa com: CO de 41% ($r = -0,41$, $P < 0,01$), capacidade de troca catiônica efetiva (t) de 29% ($r = -0,29$, $P < 0,05$) e saturação por bases (V) de 26% ($r = -0,26$, $P < 0,05$), e correlação positiva significativa com densidade (DS) de 26% ($r = 0,26$, $P < 0,05$). O carbono orgânico (CO) obteve correlação positiva moderada com: T de 36% ($r = 0,36$, $P < 0,01$) e H+Al de 37% ($r = 0,37$; $P < 0,01$) e umidade gravimétrica com 31% ($r = 0,31$; $P < 0,05$). Apresentou correlação negativa significativa apenas com densidade ($r = -0,64$; $P < 0,001$).

As bases trocáveis Ca^{2+} e Mg^{2+} apresentaram comportamentos diferentes em relação as interações entre as variáveis. O Ca^{2+} apresentou correlação positiva significativa alta com: saturação por base de 96% ($r = 0,96$, $P < 0,001$) e soma de bases com 97% ($r = 0,97$, $P < 0,001$). O teor de argila e umidade gravimétrica apresentaram correlações significativas baixas de 28% ($r = 0,28$, $P < 0,05$). Uma correlação negativa expressiva foi observada com saturação por alumínio de 84% ($r = -0,84$; $P < 0,001$). O teor de Mg^{2+} , por outro lado, apresentou correlação positiva significativa somente com T ($r = 0,30$; $P < 0,05$) e correlação negativa significativa com: Al^{3+} ($r = -0,51$, $P < 0,001$), t ($r = -0,38$, $P < 0,01$) e DS ($r = -0,38$; $P < 0,01$). A densidade do solo apresentou correlação negativa significativo com CO de 64%, T de 28% e ug de 26% e somente com pH correlação positiva significativa de 26%.

Tabela 10 – Coeficiente de correlação de Pearson para o sistema mandiocal

Var	pH	CO	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Sb	Al ³⁺	H+Al	t	T	V	m	Argila	ds	ug
pH	1															
CO	-0.41**	1														
P	-0.10n.s.	0.02n.s.	1													
Ca ²⁺	-0.20n.s.	-0.12n.s.	0.25n.s.	1												
Mg ²⁺	-0.10n.s.	0.63***	-0.12n.s.	-0.11n.s.	1											
K ⁺	-0.19n.s.	0.33*	-0.12n.s.	-0.19n.s.	0.17n.s.	1										
Sb	-0.24n.s.	0.03n.s.	0.22n.s.	0.97***	0.10n.s.	-0.07n.s.	1									
Al ³⁺	-0.15n.s.	-0.27*	0.06n.s.	-0.08n.s.	-0.51***	0.10n.s.	-0.17n.s.	1								
H+Al	0.10n.s.	0.37**	-0.09n.s.	-0.21n.s.	0.27*	0.39**	-0.12n.s.	0.09n.s.	1							
t	-0.29*	-0.22n.s.	0.20n.s.	0.57***	-0.38**	0.04n.s.	0.51***	0.76***	-0.01n.s.	1						
T	-0.02n.s.	0.36**	0.02n.s.	0.26*	0.30*	0.33**	0.35**	-0.00n.s.	0.89***	0.23n.s.	1					
V	-0.26*	-0.01n.s.	0.23n.s.	0.96***	0.09n.s.	-0.09n.s.	0.99***	-0.19n.s.	-0.26*	0.48***	0.22n.s.	1				
m	0.16n.s.	-0.13n.s.	-0.16n.s.	-0.84***	-0.33*	0.08n.s.	-0.90***	0.48***	0.12n.s.	-0.18n.s.	-0.31*	-0.91***	1			
Argila	-0.23n.s.	-0.04n.s.	-0.10n.s.	0.28*	0.02n.s.	-0.13n.s.	0.28*	0.08n.s.	-0.16n.s.	0.25n.s.	-0.02n.s.	0.30*	-0.18n.s.	1		
ds	0.26*	-0.64***	-0.22n.s.	-0.05n.s.	-0.38**	-0.21n.s.	-0.14n.s.	0.15n.s.	-0.23n.s.	0.04n.s.	-0.28*	-0.12n.s.	0.19n.s.	-0.10n.s.	1	
ug	-0.22n.s.	0.31*	0.52***	0.28*	0.17n.s.	0.07n.s.	0.33*	0.10n.s.	0.09n.s.	0.31*	0.24n.s.	0.31*	-0.26*	0.11n.s.	-0.57***	1

Var= variável; pH= Potencial Hidrogeniônico; CO= Carbono orgânico (g kg⁻¹); Ca²⁺= Cálcio (cmol_c kg⁻¹); Mg²⁺= Magnésio (cmol_c kg⁻¹); K⁺= Potássio (cmol_c kg⁻¹); Sb= Soma de base (cmol_c kg⁻¹); Al³⁺= Alumínio (cmol_c kg⁻¹); H+Al= acidez potencial (cmol_c kg⁻¹); t= capacidade de troca catiônica efetiva (cmol_c kg⁻¹); T= capacidade de troca catiônica potencial (cmol_c kg⁻¹); V= saturação por base; m= saturação por alumínio; ds= densidade (g cm³); ug= umidade gravimétrica (m³ m⁻³) ***P<0.001, **P<0.01, e *P<0.05.

A Tabela 11 corresponde aos coeficientes de correlação de Pearson do sistema de pastagem, no Sul do Amazonas. O pH apresentou correlação negativa com as variáveis Mg^{2+} , Al^{3+} e t ($r = -0,27$ a $r = -0,32$ $P < 0,05$). O carbono orgânico (CO) correlacionou-se positivamente com P, K^+ , Sb, H+Al, Ca^{2+} , T e correlação inversa com Al^{3+} e m. O P apresentou correlação positiva com Ca^{2+} , K^+ , Sb, H+Al, T e V. Soma de base e capacidade de troca catiônica potencial obtiveram correlações positivas altas com Fósforo de 46% e 55%, respectivamente ($P < 0,05$). O teor de Ca^{2+} apresentou correlação positiva alta com SB ($r = 0,97$, $P < 0,001$), T ($r = 0,61$, $P < 0,001$) e V ($r = 0,93$, $P < 0,001$) e negativa com Al^{3+} ($r = -0,53$, $P < 0,001$) e m ($r = 0,78$; $P < 0,05$). A soma de bases (SB) correlacionou-se positivamente com H+Al, T e Al^{3+} . A acidez potencial (H+Al) correlacionou-se positivamente com capacidade de troca catiônica efetiva ($r = 0,84$, $P < 0,001$) e acidez trocável ($r = 0,86$ $P < 0,001$). A capacidade de troca catiônica efetiva (t) correlacionou-se positivamente com saturação por alumínio (m) ($r = 0,49$, $P < 0,001$) e negativamente com argila ($r = -0,33$, $P < 0,001$). Também foram observadas correlações negativas entre densidade do solo (DS) e umidade gravimétrica (Ug) de 63% ($r = -0,63$, $P < 0,001$).

Tabela 11 – Coeficiente de correlação de Pearson para o sistema pastagem

Var	pH	CO	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Sb	Al ³⁺	H+Al	t	T	V	m	Argila	ds	ug
pH	1															
CO	0.14n.s.	1														
P	-0.05n.s.	0.44***	1													
Ca ²⁺	0.02n.s.	0.33*	0.38**	1												
Mg ²⁺	-0.32*	-0.03n.s.	0.01n.s.	-0.13n.s.	1											
K ⁺	0.15n.s.	0.34**	0.40**	0.09n.s.	-0.03n.s.	1										
Sb	0.03n.s.	0.39**	0.46***	0.97***	-0.04n.s.	0.33*	1									
Al ³⁺	-0.27*	-0.36**	-0.33*	-0.53***	0.21n.s.	-0.22n.s.	-0.54***	1								
H+Al	0.06n.s.	0.68***	0.49***	0.36**	0.07n.s.	0.30*	0.42***	-0.37**	1							
T	-0.30*	-0.18n.s.	-0.10n.s.	-0.01n.s.	0.23n.s.	-0.06n.s.	-0.01n.s.	0.84***	-0.17n.s.	1						
T	0.06n.s.	0.68***	0.55***	0.61***	0.05n.s.	0.35**	0.67***	-0.48***	0.96***	-0.14n.s.	1					
V	0.00n.s.	0.23n.s.	0.34**	0.93***	-0.06n.s.	0.28*	0.95***	-0.47***	0.15n.s.	0.05n.s.	0.43***	1				
M	-0.09n.s.	-0.46***	-0.41**	-0.78***	0.12n.s.	-0.36**	-0.82***	0.86***	-0.43***	0.49***	-0.62***	-0.76***	1			
Argila	0.01n.s.	0.16n.s.	-0.07n.s.	-0.24n.s.	-0.19n.s.	0.05n.s.	-0.23n.s.	-0.15n.s.	0.14n.s.	-0.33**	0.04n.s.	-0.27*	-0.02n.s.	1		
ds	0.03n.s.	-0.12n.s.	-0.15n.s.	0.14n.s.	0.26*	0.02n.s.	0.16n.s.	0.15n.s.	-0.08n.s.	0.28*	-0.01n.s.	0.18n.s.	-0.03n.s.	-0.33**	1	
ug	-0.01n.s.	-0.04n.s.	0.07n.s.	-0.01n.s.	-0.08n.s.	-0.12n.s.	-0.04n.s.	-0.08n.s.	-0.08n.s.	-0.12n.s.	-0.08n.s.	-0.02n.s.	0.01n.s.	-0.00n.s.	-0.63***	1

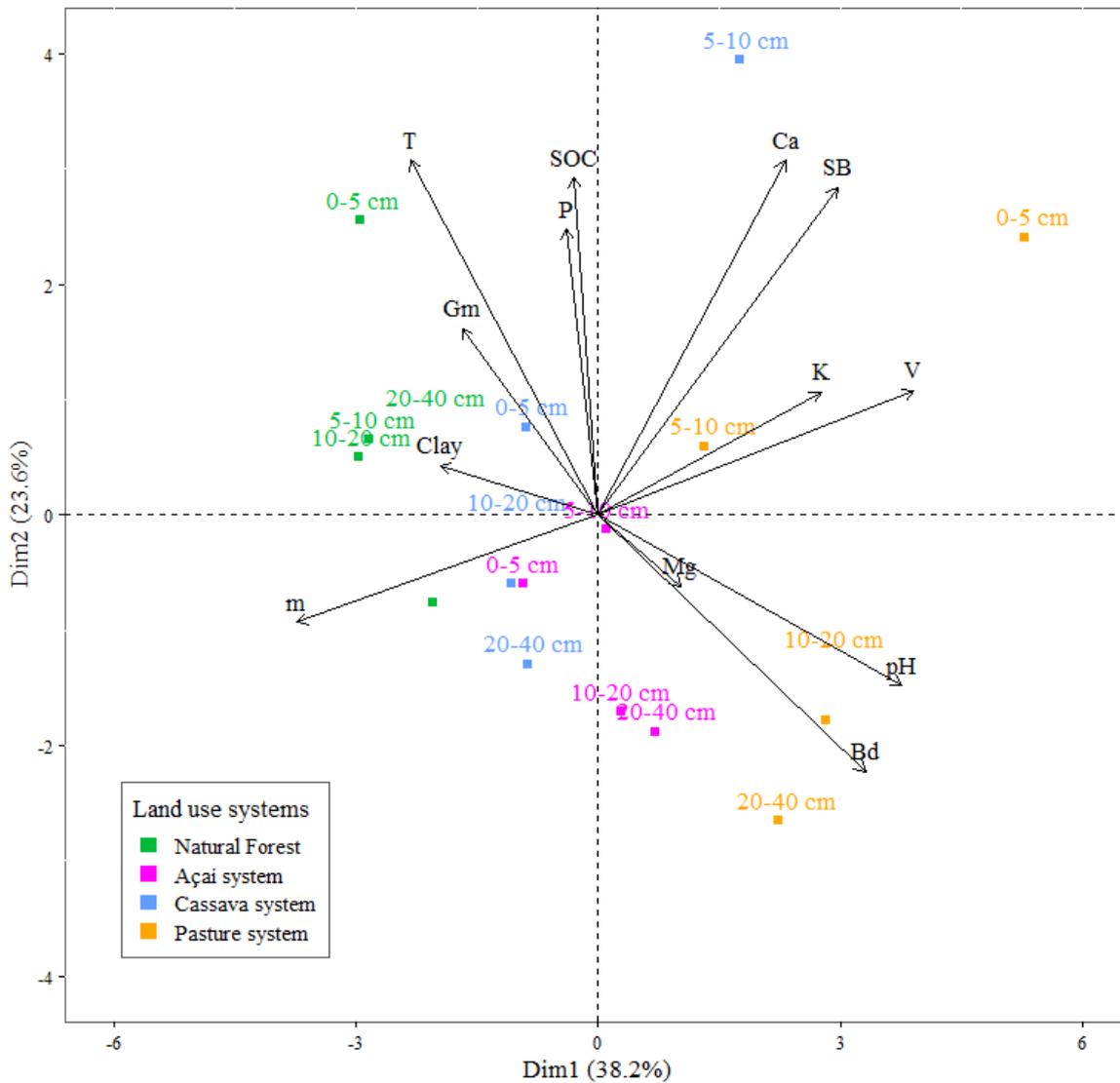
Var= variável; pH= Potencial Hidrogeniônico; CO= Carbono orgânico (g kg⁻¹); Ca²⁺= Cálcio (cmol_c kg⁻¹); Mg²⁺= Magnésio (cmol_c kg⁻¹); K+= Potássio (cmol_c kg⁻¹); Sb= Soma de base (cmol_c kg⁻¹); Al³⁺= Alumínio (cmol_c kg⁻¹); H+Al= acidez potencial (cmol_c kg⁻¹); t= capacidade de troca catiônica efetiva (cmol_c kg⁻¹); T= capacidade de troca catiônica potencial (cmol_c kg⁻¹); V= saturação por base; m= saturação por alumínio; ds= densidade (g cm³); ug= umidade gravimétrica (m³ m⁻³) ***P<0.001, **P<0.01, e *P<0.05.

7.4 Análise dos componentes principais (ACP)

A aplicação da Análise de Componentes Principais (ACP) aos diferentes sistemas de uso permitiu a redução das 16 variáveis originais para dois componentes principais, que juntos explicam 61,8% da variância total dos atributos físicos e químicos do solo (Figura 9). A primeira dimensão (DM1) é responsável por agrupar 38,2% da variância, enquanto a segunda dimensão (DM2), por discriminar 23,6% da variância. De forma geral, observa-se a formação de dois grupos distintos. O grupo à direita, relacionado ao sistema de pastagem, apresentando maiores teores de Potássio (K^+), soma de bases (SB), pH, densidade, Cálcio (Ca^{2+}) e saturação por bases (V). Já o grupo à esquerda, que inclui os sistemas de Floresta Natural e mandioccal, é caracterizado pelo aumento dos teores de argila, umidade gravimétrica (ug), saturação por alumínio (m) e capacidade de troca catiônica potencial (T). Vale destacar, que o sistema açazal localizado próximo ao centro do gráfico, não apresenta forte correlação com nenhum dos dois grupos principais.

Observa-se que na Dimensão 2 (DM2), a análise de componentes principais (PCA) discrimina os sistemas de uso da terra em função das profundidades do solo. Na parte superior, com exceção da Floresta Natural, as camadas mais superficiais (0-5 cm e 5-10 cm) apresentam maior correlação com variáveis químicas associadas à fertilidade do solo, como Potássio (K^+), soma de bases (SB), Cálcio (Ca^{2+}), saturação por bases (V), carbono orgânico (CO), teor de argila, umidade gravimétrica (ug), capacidade de troca catiônica potencial (T) e fósforo (P). Por outro lado, na parte inferior (Figura 9), agrupamentos associados às camadas mais profundas (10-20 cm e 20-40 cm), como Magnésio (Mg^{2+}), pH, densidade do solo (ds) e saturação por alumínio (m). A Floresta Natural diferente dos demais sistemas de uso é um ecossistema menos perturbado por atividades antrópicas, permitindo uma maior homogeneidade vertical nos atributos do solo.

Figura 9 – Análise dos Componentes Principais (ACP)



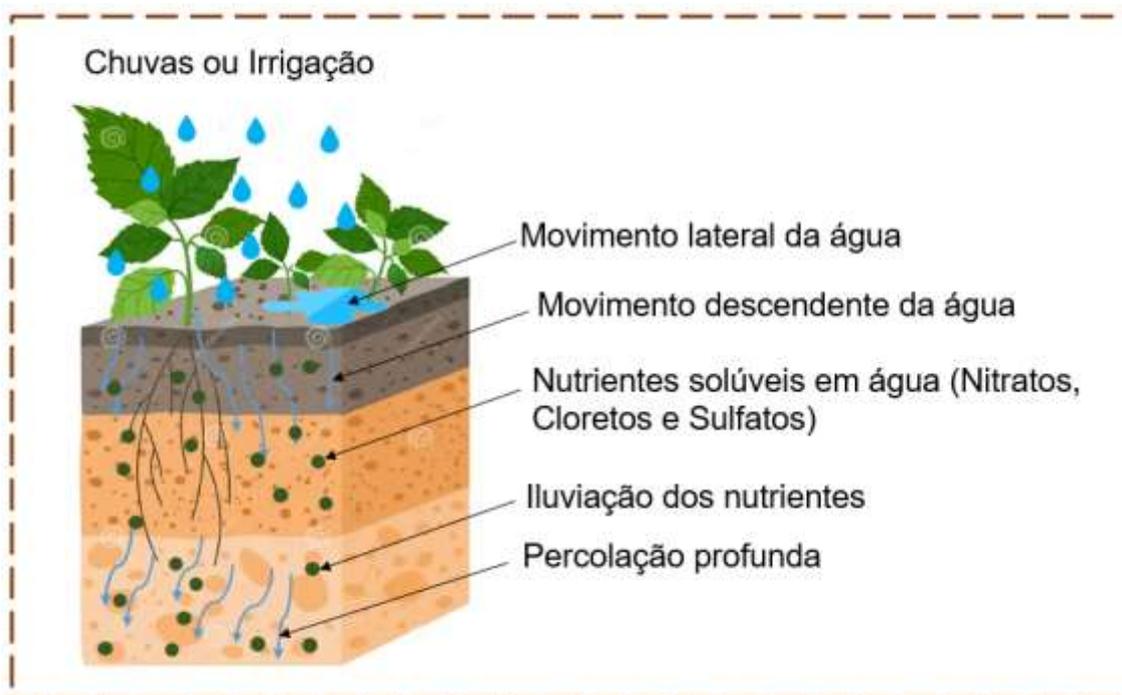
Análise de componentes principais dos índices de qualidade do solo. SB= Soma de bases; V= Saturação por base; Bd= densidade do solo; K⁺= Potássio; pH= Potencial Hidrogeniônico; Mg²⁺= Magnésio; Ca²⁺= Cálcio; P= Fósforo; T= Capacidade de troca catiônica potencial; SOC= Carbono orgânico do solo; Gm= Umidade gravimétrica; m= Saturação por alumínio.

8. DISCUSSÃO

8.1 Atributos químicos do solo

A acidez do solo (pH) é um fator determinante para compreender a disponibilidade de nutrientes, uma vez que a maioria dos nutrientes está disponível entre a faixa 5,5–6,5. No entanto, essa relação pode variar em função dos tipos de sistemas de uso da terra e vulnerabilidade inerente (Zárate-Salazar et al., 2024). Estudos desenvolvidos por Medina (2021) e Martins (2023) identificaram variações de pH entre 3,69 e 4,68 em solos amazônicos, reforçando o caráter ácido desses ambientes. Esse cenário é atribuído ao intenso processo de intemperismo, que resulta em alta saturação de alumínio (m), baixa concentração de nutrientes e maior lixiviação, conforme apontado por Mantovanelli (2016) e Aquino et al. (2016). Embora a disponibilidade de micronutrientes como Cu, Fe³⁺, Cl e Zn não tenha sido avaliada diretamente neste estudo, a literatura científica relata que a elevada acidez pode reduzir até 100 vezes a concentração desses elementos, geralmente retidos nas camadas mais superficiais do solo, afetando os serviços ecossistêmicos de provisão, ciclagem de nutrientes e, conseqüentemente, diminuindo a produtividade agrícola (Miller, 2021).

Figura 10 – Lixiviação de nutrientes



Fonte: Adaptado de Sebim, 2024.

Os resultados deste estudo evidenciam que as práticas de manejo influenciam de maneira distinta a acidez do solo. No sistema de cultivo de pastagem, os solos apresentaram menor acidez, resultado atribuído à aplicação de calagem, que melhora os atributos químicos e favorecem o crescimento e desenvolvimento das plantas. Entretanto, a ausência de adubação nesse sistema sugere que, a longo prazo, os níveis de acidez podem aumentar. Segundo Gogoi et al. (2021), para prevenir a reincidência da acidificação do solo, é essencial realizar um manejo racional dos corretivos agrícolas. No contexto de práticas sustentáveis, os autores enfatizam a importância de estratégias a longo prazo. Eles observaram que a aplicação integrada de nutrientes orgânicos ao longo de 32 anos contribuiu para a melhoria do pH do solo, resultando em um aumento significativo no rendimento das culturas. Em contraste, sistemas agrícolas sem o aporte de nutrientes externos apresentaram impactos negativos nos serviços ecossistêmicos, incluindo a provisão e ciclagem de nutrientes, além de uma redução expressiva na atividade metabólica de microrganismos, como bactérias fixadoras de nitrogênio.

A acidez potencial (H+Al) exerce influência significativa sobre a qualidade e funcionalidade dos serviços ecossistêmicos do solo, que, segundo Tang et al. (2019), dependente de uma interação combinada entre múltiplos fatores e não da maximização isolada de uma única função. Os maiores níveis de H+Al, observados em sistemas de pastagem e açaí, assim como em áreas submetidas a práticas de queima (Matos et al., 2012), estão diretamente associados à lixiviação intensa que podem ocorrer de forma natural (chuva) ou por irrigação (Figura 10) (Oliveira et al, 2015). Esses fatores resultam na perda de cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+), essenciais para a fertilidade, e comprometem os serviços de provisão, como a produtividade agrícola, especialmente em pastagens e cultivos de açaí. Além disso, a toxicidade do alumínio (Al^{3+}) em solos com alta acidez potencial pode ser prejudicial no desenvolvimento radicular das plantas, interferindo nos serviços de suporte, como o crescimento vegetal e a sustentação da biodiversidade.

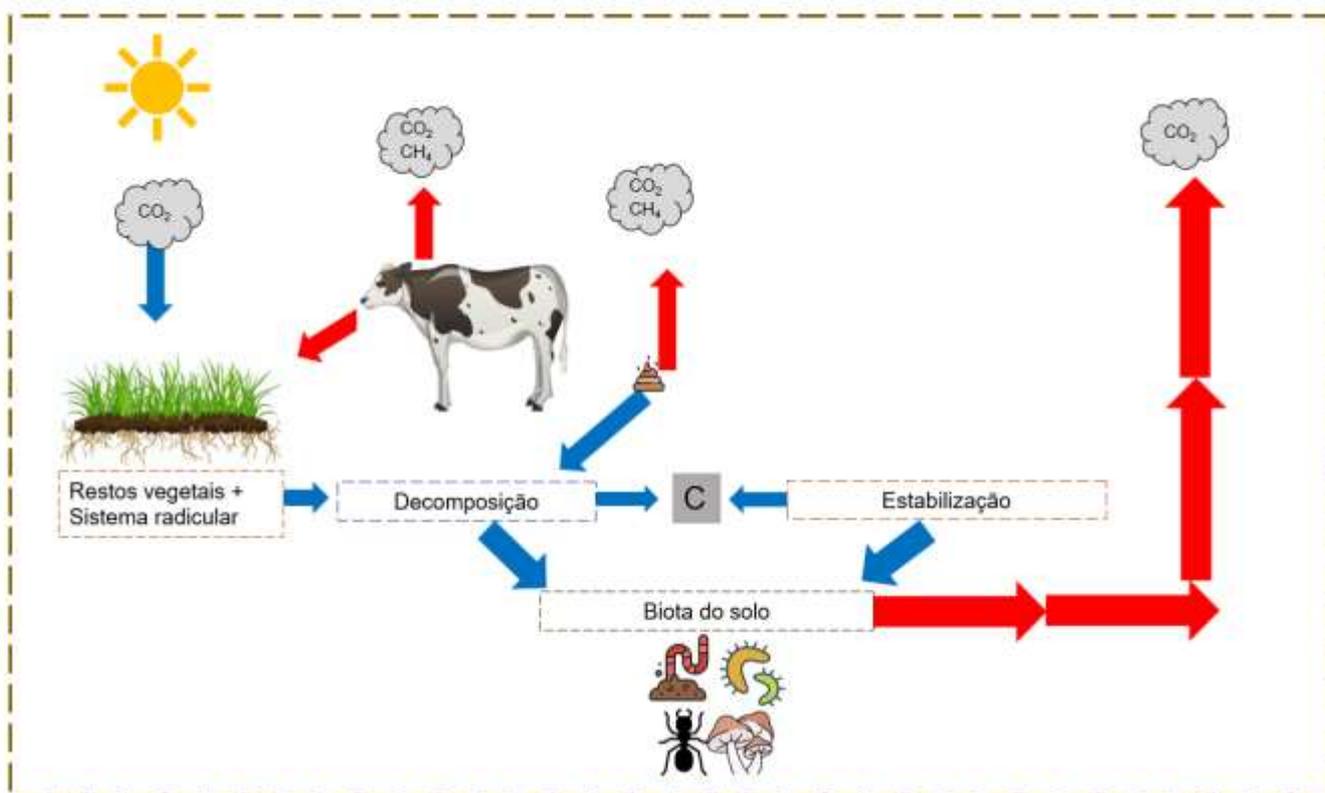
Os solos da região amazônica, em sua maioria, apresentam baixa disponibilidade de nutrientes (Frare et al., 2023). Um padrão consistente de menor teor de Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} e P foram encontrados em todos os sistemas de uso da terra. Mg^{2+} , SB, V e K^+ apresentaram maiores valores no ambiente pastagem nas camadas superficiais, diminuindo ao longo das profundidades. De acordo com Suliman e Mühling (2021) a deposição e distribuição de resíduos animais desempenham um papel fundamental na ciclagem de nutrientes nas pastagens, compostos como: N, Na e K^+ são adicionados ao solo por meio de dejetos animais, melhorando a eficiência da ciclagem de nutrientes a longo prazo (Nascimento et al., 2024), embora dependendo do manejo, isto pode ser discutido, pois como observado nos resultados, geralmente camadas mais profundas apresentam maior compactação. Os níveis mais baixos de nutrientes no solo foram encontrados pela Floresta Natural, semelhante aos resultados encontrados por Souza (2018) ao avaliar os atributos do solo em áreas sob diferentes usos na região Amazônica. A diminuição de nutrientes em solos Amazônicos pode ser justificada pela lixiviação causada pela alta precipitação da região.

Os relatos na literatura sobre os teores de carbono orgânico encontrados nos solos apresentam divergências a respeito da substituição de Floresta Natural por pastagem cultivada (Zenero et al., 2016). Alguns resultados apontam teores

semelhantes ou superiores em solos sob manejo de pastagem (Carneiro et al., 2009; Seó et al., 2017; Jordão et al., 2022) atribuídos, em grande parte, ao sistema radicular das gramíneas responsáveis por proporcionar maior aporte de matéria orgânica e à prática frequente de adubação das pastagens. Em contrapartida, outros estudos relatam teores mais altos de CO nos solos sob Floresta Natural (Cardoso et al., 2010; Cardoso et al., 2013; Neves Neto et al., 2013; Lima et al., 2022). Em geral, essas características são associadas à limitação de nutrientes em pastagens e ao aumento no aporte global de matéria orgânica fornecida pela vegetação nativa, devido à deposição constante e diversificada de substratos orgânicos, que apresentam diferentes níveis de decomposição, provenientes de uma vegetação natural com maior diversidade de espécies (Souza et al., 2024).

Os dados da Tabela 4 indicam que os sistemas de pastagem possuem os maiores teores de carbono orgânico total. O que está alinhado com estudos que relacionam a qualidade das forragens ao armazenamento de carbono e à atividade microbiana no solo (Lange et al., 2015; Oelmann et al., 2021). A interação dinâmica entre plantas, microrganismos e animais nas pastagens cria uma rede ecológica complexa, que favorece a ciclagem de nutrientes e o armazenamento de carbono conforme ilustrado na Figura 11, superando a funcionalidade de florestas naturais e sistemas agrícolas mais intensivos (Neal et al., 2020; Mendes et al., 2019). Em contraste, os baixos estoques de carbono observados no sistema mandiocal evidenciam os impactos negativos de práticas agrícolas intensivas, que, como apontado por Six et al. (2002), desestabilizam os agregados do solo, expondo a matéria orgânica à decomposição microbiana e comprometendo serviços como a retenção de nutrientes, regulação do gás carbônico e controle da erosão.

Figura 11 – Dinâmica do CO no sistema de pastagem. Setas azuis indicam a entrada e processos de transformação de C no solo e as setas vermelhas as saídas de C no solo.



Fonte: Adaptado de Cherubim et al, 2023.

Os índices de saturação por alumínio (m) são calculados a fim de identificar a toxicidade ou eficiência de uma cultura ou manejo. Para uma análise mais precisa da toxicidade do solo, é fundamental calcular o percentual de saturação por alumínio (m). Níveis superiores a 30% podem limitar o crescimento de culturas. Entre 30% e 50%, o solo apresenta toxicidade moderada, enquanto valores acima de 50% indicam toxicidade elevada, exigindo medidas urgentes na subsuperfície (EMPRAPA, 2018). Como observado na Tabela 5, os sistemas apresentaram níveis altos ($m > 50\%$) de toxidez, com menores valores encontrados em ambiente de Floresta Natural e maiores pela pastagem. Esses resultados corroboram parcialmente com os de Jordão (2022) que nos ambientes de pastagem (83,94%), mandiocal (69,57%) e Floresta Natural (85,61%), encontrou níveis altos de saturação por alumínio, no entanto para área açazal (21,38%) os níveis foram considerados baixos. Outros trabalhos desenvolvidos na região também encontraram resultados semelhantes para saturação por alumínio com variações de 60% a 90% para solos amazônicos (Moreira e Fageria, 2009; Brito et al. 2022).

8.2 Atributos físicos do solo

Os sistemas de pastagem apresentaram os maiores valores de umidade gravimétrica, especialmente nas profundidades de 0-5 cm e 5-10 cm, o que indica uma maior capacidade de retenção de água, atribuída principalmente à elevada proporção de argila nesses solos (Robin et al, 2018). Embora os valores de densidade do solo nas pastagens sejam elevados, variando entre 1,50 e 1,55 g cm⁻³, o alto teor de matéria orgânica atua como um fator que reduz a compactação, ao dissipar a energia aplicada ao solo e promover a estabilização dos agregados, favorecendo a formação de poros (Okach et al., 2019). Em contraste, sistemas como a Floresta Natural e o açcaizal obtiveram menores valores de Ds, indicando solos com maior porosidade e, conseqüentemente, mais eficientes à atividade biológica (Jimenez et al., 2017). Robin et al., 2018 ressalta que a compactação em sistemas agrícolas ou pastagens pode ser mitigada por práticas como o uso de cobertura morta, que favorecem a agregação do solo, aumentam a estabilidade dos agregados e melhoram a retenção de água.

Solos menos compactados, como os da Floresta Natural, promovem um maior enriquecimento e uma ciclagem mais eficiente de nutrientes, embora apresentem menor capacidade de retenção hídrica (Sena et al., 2020). Além disso, a densidade do solo foi identificada como uma variável essencial para a estabilidade física e função de suporte das plantas, influenciando sua capacidade de permanecer eretas. Este atributo foi destacado no estudo de Hyun et al. (2022) ao avaliar o Índice de Qualidade do Solo (IQS) e a relação com os serviços ecossistêmicos (SE). Os autores enfatizaram que o manejo adequado do cultivo pode melhorar significativamente processos como o armazenamento e a infiltração de água, a estabilização da matéria orgânica (MO) e as funções de retenção de nutrientes, contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas de uso da terra.

8.3 Interação dos atributos físicos e químicos do solo

A análise dos teores de argila nos diferentes sistemas de uso do solo revelou correlações significativas, embora baixas, com a densidade, especialmente nos ambientes de açcaí e pastagem. Segundo Yu et al. (2018), os teores de argila são considerados indicadores positivos da qualidade do solo devido à sua contribuição para a agregação e o sequestro de carbono. Contudo, neste estudo, não foram

realizadas integrações entre diferentes propriedades do solo para a determinação de IQ, o que limita uma avaliação mais abrangente. Conforme destacado por Zárates-Salazar et al. (2024), muitos trabalhos sobre qualidade do solo abordam propriedades de forma isolada, negligenciando a interação entre aspectos físicos, químicos e biológicos em um contexto integrado. Essa abordagem limitada pode levar a interpretações incompletas, já que baixos teores de argila, por exemplo, não indicam necessariamente solos de baixa qualidade. Para uma avaliação mais robusta, é fundamental considerar fatores como a classificação pedológica e o histórico de manejo, que desempenham papéis determinantes na qualidade do solo. A ausência de integração metodológica representa, assim, uma lacuna que dificulta análises holísticas e comparativas entre diferentes sistemas e práticas de manejo (Marion et al., 2022).

Os resultados deste estudo, que identificaram correlações negativas entre o carbono orgânico (CO) e pH em todos os sistemas de uso do solo, estão em consonância com as observações de Zhang et al. (2021), que indicam que o aumento do teor de carbono orgânico pode estar ligado à acidificação do solo devido à liberação de ácidos orgânicos durante a decomposição da matéria orgânica, influenciando diretamente o pH. Esses resultados sugerem um potencial impacto negativo do acúmulo de CO na qualidade do solo, corroborando estudos que associam a acidificação à mobilização de elementos como alumínio e manganês, além da lixiviação de nutrientes (Guo et al., 2010). Em uma perspectiva regional, as mudanças nos níveis de CO e pH estão condicionadas a propriedades intrínsecas do solo, como teores de argila, tipo de solo, capacidade de troca catiônica (CTC) e capacidade de tamponamento do pH, além de fatores como condições iniciais do solo (pH e teor de CO), variáveis climáticas (chuvas e temperaturas) e práticas de uso e manejo da terra (Zhang et al., 2018; Liu et al., 2019).

Os resultados para o serviço ciclagem de nutrientes pode ser compreendido com base na correlação de CO e capacidade de troca catiônica potencial. Solos ricos em carbono orgânico apresentam valores superiores de CTC devido às cargas negativas disponíveis para a troca de nutrientes (Baldotto et al., 2015; Enang et al., 2022). No sistema de açcaizal, a alta correlação entre CO e T, reflete sua capacidade em acumular matéria orgânica e formar superfícies coloidais que promovem a retenção de cátions, assim como observado no ambiente de pastagem e Floresta

Natural (Medeiros et al., 2018). Em contraste, o sistema de mandioca apresentou correlação inferior, atribuída a baixa adição de matéria orgânica e do revolvimento frequente do solo, que reduziu o carbono orgânico e, conseqüentemente, o CTC. Esses dados confirmam que a combinação de altos teores de matéria orgânica e argila é essencial para aumentar a CTC, explicando o melhor desempenho de sistemas como açazal, pastagem e floresta natural em comparação com sistemas agrícolas mais intensivos, corroborando os resultados encontrados por Távora et al. (2022).

A análise de componentes principais (ACP) é uma das principais técnicas de análise multivariada, amplamente utilizada para identificar padrões, classificar informações e modelar dados. No contexto da avaliação do IQS, os métodos mais comuns usados para esse objetivo são a opinião de especialistas e métodos estatísticos como ACP. A opinião de especialista, embora pode ser tendenciosa devido ao julgamento individual, o uso de ACP é mais objetiva para reduzir variáveis, identificando aquelas que são mais significativas nos dados. A ACP fornece poucas combinações de indicadores não correlacionados e simplifica conjuntos de dados complexos sem perturbar a estrutura original (Abdel-Fattah et al., 2021). A variância encontrada nesse estudo de 61,8% corrobora com os resultados de Freitas et al. (2011) que obtiveram valores de 70,0% distribuído em atributos físicos e químicos em solos amazônicos.

As mudanças nos atributos do solo e na prestação de serviços ecossistêmicos (SE) entre diferentes sistemas de uso e a Floresta Natural são claramente evidenciadas pela formação de dois grupos distintos (Figura 9) na ACP. O primeiro grupo (DM1), reflete a relação do sistema de pastagem com maior densidade do solo, pH, soma de base, Ca^{2+} e saturação por bases e da Floresta Natural, principalmente, associada com maiores teores de argila e umidade gravimétrica, enquanto o segundo grupo (DM2) discriminou os sistemas de uso da terra em função da profundidade, camadas mais profundas associadas a maior densidade do solo, maior pH, por outro lado, camadas superficiais maiores teores de CO, maior Fósforo, evidenciando que a conversão da Floresta Natural em pastagem por provoca mudanças na prestação de SE, liberando cátions básicos previamente armazenados na biomassa florestal. Esse processo eleva o pH e a saturação por bases, correlações também evidenciadas por Rocha et al. (2023), ao avaliar como as mudanças no uso da terra na Floresta amazônica afetam a fertilidade do solo. Esse efeito já foi amplamente demonstrado

em vários estudos devido à deposição de cinzas, em práticas de corte e queima, gerando o aquecimento do solo e o aumento temporário das taxas de reserva da matéria orgânica (Palm et al., 1996; Bieluczyk et al., 2025). Os modelos explicativos dessas mudanças foram propostos há muito tempo (Giardina et al., 2000; Numata et al., 2007), indicando que a deposição de cinzas pode ser um dos principais mecanismos responsáveis pelo aumento temporário da fertilidade do solo em camadas mais superficiais após a queima da biomassa (Lucas-Borja et al., 2019)

A homogeneidade dos atributos do solo em Florestas Naturais observados no ACP (Figura 9) reflete a ausência de perturbações antrópicas, garantindo a estabilidade físico-química do solo ao longo das profundidades. Diferente das áreas manejadas, como pastagens, mandiocal e açazal, que sofrem revolvimento, compactação e adição de fertilizantes químicos, as Florestas Naturais mantêm uma distribuição uniforme de nutrientes e umidade devido à ciclagem contínua da matéria orgânica e estruturação natural do solo. Estudos como os de Numata et al. (2007) evidenciam que a conversão de florestas em sistemas de manejo causa variações temporais significativas nos nutrientes com a profundidade, enquanto a Floresta Natural preserva perfis mais homogêneos. Senjobi e Ogunkunle (2011) observaram que áreas protegidas apresentam características físico-químicas mais estáveis, incluindo maior retenção de água e melhor textura do solo, fornecendo de forma contínua SE essenciais, como regulação hídrica, estabilidade estrutural do solo, sequestro de carbono e manutenção da fertilidade do solo, enquanto sistemas de manejo intensificam a compactação e a heterogeneidade dos atributos, comprometendo a qualidade e funcionalidade do SE solo ao longo do tempo (Shabanpour et al., 2020).

A interação entre os serviços de provisão e regulação no solo está diretamente relacionada ao papel da matéria orgânica na melhoria da fertilidade do solo (Lin et al., 2025), que contribui para a formação de uma estrutura granular, favorecendo a aeração, a drenagem e a capacidade de retenção de água e nutrientes, fatores que, conseqüentemente, tendem a elevar a produtividade dos sistemas agrícolas. (Liu et al., 2021a). Conforme observado na Figura 9, o sistema de pastagem apresentou correlações direta com CO. Segundo Carneiro et al. (2009), esse comportamento pode corresponder à cobertura permanente e uma ampla distribuição do sistema

radicular, que ajudam reduzir os impactos das variações climáticas, promovendo um aumento gradual do teor de carbono orgânico no solo. Partindo do pressuposto de que existe uma relação inversa entre o uso do solo e sua qualidade, era esperado que os índices de nutrientes do solo fossem mais elevados na área de Floresta Natural em comparação com outros ambientes. Essa condição também foi confirmada por Jordão et al. (2020) ao avaliar atributos químicos em solos amazônicos.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

9.1 Limitações do Estudo e Perspectivas Futuras

Nossa avaliação de SE por meio de atributos físicos e químicos analisados fornece resultados valiosos para o setor agrícola, ambiental e científico. Para melhor avaliar e gerenciar, é essencial compreender a dinâmica da cultura, o manejo utilizado e quais atributos conseguem fornecer melhores correlações com os SE. No entanto, não avaliamos nesse trabalho as variações sazonais e nem realizamos análises visuais da estrutura do solo, que poderiam fornecer informações fundamentais sobre a sensibilidade do manejo quanto a esses indicadores. Além disso, a ausência de mais variáveis biológicas, como a atividade microbiana, a biomassa edáfica e atividade enzimática limita a compreensão da interação entre os atributos do solo e os processos ecológicos que regulam os SE.

Também não foram consideradas variáveis relacionadas à condutividade hidráulica e estabilidade de agregados, que poderiam refinar a avaliação do serviço de compactação do solo e da retenção de água. Por fim, considerando que, os serviços ecossistêmicos estão cada vez mais sendo analisados em conjunto com a qualidade do solo, o que torna essencial a integração dos indicadores do solo em índices de qualidade do solo para que sejam determinados os limites críticos. Essa abordagem permitiria uma avaliação mais abrangente das funções ecossistêmicas do solo, estabelecendo valores-limite dos indicadores de qualidade que, quando ultrapassados, podem comprometer a sustentabilidade do uso da terra e os serviços ecossistêmicos prestados. A definição desses limites é fundamental para monitorar o estado do solo, prever possíveis processos de degradação e propor estratégias de manejo sustentável que garantam a provisão dos SE.

10. CONCLUSÕES

O manejo da terra altera o equilíbrio físico e químico do solo, proporcionando um aumento temporário na disponibilidade de nutrientes em áreas de pastagem e cultivo de açaí, principalmente devido ao uso de práticas agrícolas como correção do solo e aplicação de fertilizantes. No entanto, essas mudanças também elevam à acidificação do solo e ao aumento dos teores de alumínio, especialmente no cultivo de mandioca. A pastagem obteve maiores teores de carbono orgânico do solo nas camadas em todas as profundidades, contribuindo para a o fornecimento do serviço ecossistêmico de armazenamento de CO no solo, por outro lado, apresentou maior compactação e menor relação com o serviço ecossistêmico de retenção de água.

A Floresta Natural fornece o serviço ecossistêmico de retenção de água, atribuído principalmente à correlação com o atributo umidade gravimétrica. O sistema açazal oferece serviços ecossistêmicos de ciclagem de nutrientes, porém apresenta menores teores de umidade gravimétrica, e, conseqüentemente, menos retenção hídrica. Por fim, o sistema mandiocal foi o sistema que menos contribuiu para a prestação de serviços ecossistêmicos com teores de carbono intermediários entre o sistema de pastagem e açaí.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-FATTAH, M. K; MOHAMED, E. S; WAGDI, E. M; SHAHIN, S. A; ALDOSARI, A. A; LASAPONARA, R.; ALNAIMY, M. A Avaliação quantitativa da qualidade do solo usando análise de componentes principais: o estudo de caso da Depressão El-Fayoum, Egito. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1824, 2021.
- ADHIKARI, K; HARTEMINK, A. E. Ligando solos a serviços ecossistêmicos — Uma revisão global. **Geoderma**, v. 262, p. 101–111, 2016.
- ALMEIDA, A. T.; SIMÕES, K. S.; ALMEIDA, J. R. C.; PEIXOTO, C. P.; PEIXOTO, M. F. S. P. Qualidade biológica do solo em sistema de policultivo no semiárido da Bahia. **Ciência Agrícola**, Rio Largo, v. 15, n. 2, p. 75-81, 2017.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; MITCHEL, J. P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 90, p. 25–45, 2002.
- AQUINO, R. E. de; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; OLIVEIRA, I. A. de; FRANCISCON, U.; SILVA, D. M. P. da; CUNHA, J. M. da. Chemical soil attributes evaluated by multivariate techniques and geostatistics in the area with agroforestry and sugarcane in Humaitá, AM, Brazil. **Bioscience Journal**, v.32, n. 1, p. 61-72, 2016.
- AZEVEDO, A. A.; RAJÃO, R.; COSTA, M. A.; ESTÁVEL, M. C. C.; MACEDO, M. N.; DOS REIS, T. N. P.; ALENCAR, A.; SOARES-FILHO, B. S.; PACHECO, R. Limites do Brasil's Código Florestal como meio para acabar com o desmatamento ilegal. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 114, n. 29, p. 7653–7658, 18 jul. 2017.
- BAER, S. G.; BIRGÉ, H. E. Soil ecosystem services: an overview. Managing soil health for sustainable agriculture. Volume 1: Fundamentals. **Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing**, ISBN 978-1-78676-188-0, 2018.
- BAG, R.; MONDAL, I.; DEHBOZORGI, M.; BANK, S.P; DAS, D.N; BANDYOPADHYAY, J.; PHAM, Q.B; AL-QURAIISHI, A.M.F; NGUYEN, X.C Modelagem e mapeamento da suscetibilidade à erosão do solo usando aprendizado de máquina em um ambiente tropical quente subúmido. **Journal of Cleaner Production**, v. 364, p. 132428, 2022.
- BALDOTTO, MA; VIEIRA, EM; SOUZA, DÓ; BALDOTTO, LEB Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. **Revista Ceres**. v. 3, pág. 301-309, 2015.
- BAŞKENT, E. Z.; BALÇ, H. A priori allocation of ecosystem services to forest stands in a forest management context considering scientific suitability, stakeholder engagement and sustainability concept with multi-criteria decision analysis (MCDA) technique: A case study in Turkey. **Journal of Environmental Management**, v. 369, p. 122230, out. 2024.

BEDOLLA-RIVERA, H. I.; NEGRETE-RODRÍGUEZ, M. L. X.; GÁMEZ-VÁZQUEZ, F. P.; ÁLVAREZ-BERNAL, D.; CONDE-BARAJAS, E. Analyzing the impact of intensive agriculture on soil quality: a systematic review and global meta-analysis of quality indexes. **Agronomy**, v. 13, n. 8, p. 2166, 2023.

BERMEO, J. P. C; HINCAPIE, K. L. P; CHERUBIN, M. R; MOREA, F. A. O; OLAYA, A. M. S. Avaliação da qualidade do solo em sistemas silvipastoris pelo Soil Management Assessment Framework (SMAF) na Amazônia colombiana. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 53, 2022.

BIELUCZYK, W.; DUARTE, M.P; MARTINS, G.L; MANDRO, J.A; CAMARGO, P.B; NORONHA, N.C; PICCOLO, M.C; TSAI, S.M. Agricultura de corte e queima interrompeu o potencial de armazenamento de carbono e a multifuncionalidade do ecossistema das florestas secundárias da Amazônia. **Agricultura, Ecossistemas e Meio Ambiente**, v. 381, p. 109413, 2025.

BLANCO, J.; DENDONCKER, N.; BARNAUD, C.; SIRAMI, C. Os desserviços ecossistêmicos são importantes: rumo à sua integração sistemática na investigação e política dos serviços ecossistêmicos. **Ecosystem Services**, v. 36, p. 100913, 2019.

BONGIORNO, G.; BÜNEMANN, E. K.; OGUEJIOFOR, CU; MEIER, J.; GORT, G.; COMANS, R.; MÄDER, P.; BRUSSAARD, L.; DE GOEDE, R. Sensibilidade de frações de carbono lábeis ao preparo do solo e ao manejo da matéria orgânica e seu potencial como indicadores abrangentes da qualidade do solo em condições pedoclimáticas na Europa. **Ecological Indicators**, v. 99, p. 38-50, 2019.

BRAVO-MEDINA, C.; GOYES-VERA, F.; ARTEAGA-CRESPO, Y.; GARCÍA-QUINTANA, Y.; CHANGOLUISA, D. Um índice de qualidade do solo para sete paisagens produtivas no sopé andino-amazônico do Equador. **Degradação e Desenvolvimento de Terras**, v. 32, p. 1–16, 2021.

BRITO, W. B. M.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, F. G.; LIMA, A. F. L.; MARTINS, T. S.; CUNHA, J. M. da. **Suscetibilidade magnética de Argissolos sob floresta e cultivados no sul do Amazonas. In: Solos Amazônicos: atributos físicos, químicos, erodibilidade e suscetibilidade magnética.** Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DE DEYN, G.; DE GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; VAN GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality: A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105-125, 2020.

CAHYANA, D; MULYANTO, B. Uma definição simples de solo. **Segurança do Solo**, v. 16, 2024.

CAMPOS, M. C. C.; BERGAMIN, A. C.; CUNHA, J. M.; OLIVEIRA, I. A. Caracterização dos atributos dos solos em ambiente natural e transformado na região sul do Amazonas. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 34., Goiânia. Anais. Goiânia: SBCS, p. 09-13, 2015.

CARDOSO, E. J. B. N.; VASCONCELLOS, R. L. F.; BINI, D.; MIYAUCHI, M. Y. H.; SANTOS, C. A.; ALVES, P. R. L.; PAULA, A. M.; NAKATANI, A. S.; PEREIRA, J. M.; NOGUEIRA, M. A. 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, 2013.

CARDOSO, E.L.; SILVA, M.L.N.; MOREIRA, F.M. de S.; CURI, N. Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em pastagem cultivada e nativa no Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.631-637, 2010.

CARNEIRO, M.A.C.; SOUZA, E.D. de; REIS, E.F. dos; PEREIRA, H.S.; AZEVEDO, W.R. de. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.147-157, 2009.

CHEN, X.-C.; YAO, C.-C.; WANG, A.; ZHANG, Z.-D.; CHEN, L.-Z.; ZHANG, J.-Y.; LIU, X.-H.; LI, H.-B. Riscos da aplicação de agentes mobilizadores para remediação de solos contaminados com arsênio: efeitos do ditionito-EDTA e do ácido cítrico no fracionamento do arsênio, lixiviabilidade, biodisponibilidade oral/bioacessibilidade e especiação. **Journal of Hazardous Materials**, v. 444, parte A, p. 130416, 2023.

CHERUBIN, M.R; MAIA, S.M.F; DAMIAN, J.M; CERRI, C.E. Matéria orgânica do solo em áreas de pastagens no Brasil. In: **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropicais e subtropicais**. Brasília: Embrapa, 2023.

CHISTÉ, R. C; COHEN, K.O; ABREU, F. A. P. Processamento artesanal da mandioca e de suas conclusões nas comunidades rurais do Estado do Pará. *Circular Técnica Embrapa*, n. 261, 2010.

CORDEIRO, R. A. M.; SENA, W. L.; SILVA, A. L. P.; MEIRELES, R. O.; PIRES, E. S.; SOUZA, F. C. A.; CANTUÁRIA, P. C.; SILVA E SILVA, B. M. Influência da produção do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) na geração de renda e fortalecimento da agricultura familiar. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, ISSN: 1696-8352, 2024.

COSTA, A. M. da; MOURA, M. S. de; NAVARRO, I. F.; SILVA, V. C. da; PISSARRA, T. C. T.; VALERA, C. A.; FERNANDES, L. F. S.; PACHECO, F. A. L. Potencial de serviços ecossistêmicos e políticas de conservação do solo com ênfase em pastagens degradadas no Brasil. **Geografia e Sustentabilidade**, v. 5, n. 4, p. 660-672, 2024.

DEMETRIO, W. C.; BROWN, G. G.; PUPIN, B.; DUDAS, R. T.; NOVO, R.; MOTTA, A. C. V.; BARTZ, M. L. C.; BORMA, L. S. **Macrofauna do solo e funções relacionadas à água em manchas de Mata Atlântica em regeneração no Brasil**. *Pedobiologia*, v. 103, p. 150944, mar. 2024.

DOMINATI, Estelle; PATTERSON, Murray; MACKAY, Alec. Uma estrutura para classificar e quantificar o capital natural e os serviços ecossistêmicos dos solos. **Ecological Economics**, v. 69, n. 9, p. 1858–1868, 2010.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.), *Methods for Assessing Soil Quality*. Madison: **Soil Science Society of America**, p. 25–37, 1996.

DÖRNER, J.; BRAVO, S.; STOORVOGEL, M.; DEZ, D.; VALE, S.; CLUNES, J.; HORN, R.; UTEAU, D.; WENDROTH, O.; LAGOS, L.; ZÚÑIGA, F. Efeitos de curto prazo da compactação nas propriedades mecânicas do solo e nas funções dos poros de um Andisol. **Soil & Tillage Research**, v. 221, p. 105396, 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – **EMBRAPA**. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – **EMBRAPA**. *VII Plano Diretor da Embrapa: 2020–2030*. Brasília, DF: Embrapa, 2020.

ENANG, R.K; KIPS, Dr. YERIMA, B.P.K; KOME, G.K; RANS, E. Van. Funções de pedotransferência para estimativa da capacidade de troca catiônica em solos altamente intemperizados das terras altas tropicais do noroeste de Camarões. **Geoderma Regional**, v. 29, 2022.

FAO - World Food and Agriculture. Statistical Yearbook 2020. FAO (Rome), 2020.

FAO. Save and Grow: *Cassava – A guide to sustainable production intensification* (Poupar e Crescer: Mandioca – Um guia para a intensificação da produção sustentável). **Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura**, 2013.

FERNANDES, A.M Análise da produção de mandioca no Brasil: tendências e perspectivas. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Federal do Pará, 2018.

FILHO, I. G. L.; AGUIAR, M. I. de; ALMEIDA, M. V. R. de; BLUM, S. C.; ZULIANE, D. Q. Qualidade química do solo em sistemas de produção agroecológicos. **Agrarian Academy**, Jandaia-GO, v. 9, n. 18, p. 44, 2022.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A.; FRANKLIN, D. H. Water infiltration and surface soil structural properties as influenced by animal traffic in the Southern Piedmont USA. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 27, p. 256–265, 2011.

FRARE, J. C. V.; MARTINS, G. C.; FREITAS, L. de; OLIVEIRA, I. A. de; RAMOS, S. Bioeconomia na Amazônia: importância da matéria orgânica do solo para a manutenção dos sistemas produtivos. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 2, 2023.

FREITAS. L.; CASAGRANDE, J. C.; DESUÓ, I. C. Atributos químicos e físicos de solo cultivado com cana-de-açúcar próximo a fragmento florestal nativo. **Holos Environment**, v.11, n.2, p.11:137-147, 2011.

FRIZZLE, C.; FOURNIER, RA; TRUDEL, M.; LUTHER, JE Usando uma ferramenta de avaliação de solo e água para desenvolver um índice baseado em LiDAR do serviço ecossistêmico de regulação da erosão. **Journal of Hydrology**, v. 595, pág. 126009, abr. 2021.

GALHENA, D. H.; FREED, R.; MAREDIA, K. M. Home gardens: a promising approach to enhance household food security and wellbeing. **Agriculture & Food Security**, v. 2, p. 8, 2013.

GAO, H.; XIAOJUN, S.; WU, X.; ZHANG, N.; LIANG, T.; WANG, Z.; YU, X.; DUAN, C.; HAN, Z.; LI, S. Efeitos interativos da erosão do solo e da compactação mecânica na dinâmica do COD do solo e nas emissões de CO₂ em terras aráveis em declive. **CATENA**, v. 238, pág. 107906, 2024.

GIARDINA, C.P; SANFORD Jr., R.L; DOCKERSMITH, I.C; JARAMILLO, V.J. Os efeitos da queima de corte nos nutrientes do ecossistema durante a fase de preparação da terra do cultivo itinerante. **Plant and Soil**, v. 220, p. 247–260, 2000.

GILES-HANSEN, K.; LI, Q.; WEI, X. Os efeitos cumulativos da perturbação florestal e da variabilidade climática no fluxo de água na bacia hidrográfica do rio Deadman. **Forests**, v. 10, n. 2, pág. 196, 2020.

GITHONGO, M. W.; KIBOI, M. N.; NGETICH, F. K.; MUSAFIRI, C. M.; MURIUKI, A.; FLIESSBACH, A. The effect of minimum tillage and animal manure on maize yields

and soil organic carbon in sub-Saharan Africa: A meta-analysis. **Environmental Challenges**, v. 5, p. 100340, 2021.

GOGOI, B.; BORAH, N.; BAISHYA, A.; NATH, D. J.; DUTTA, S.; DAS, R.; BHATTACHARYYA, D.; SHARMA, K. K.; VALENTE, D.; PETROSILLO, I. Enhancing soil ecosystem services through sustainable integrated nutrient management in double rice-cropping system of North-East India. **Ecological Indicators**, v. 132, p. 108262, 2021.

GOMES, J. B. V.; FERNANDES, M. F.; PACHECO, E. P.; BARRETO, A. C.; NORTON, L. D.; CURI, N. Calcareous soils in the Northeastern of Brazil: Alterations of attributes from different land use history. **Soil & Tillage Research**, v. 155, p. 27-34, jan. 2016.

GUO, J; LIU, X; ZHANG, Y; SHEN, Jianlin; H, Wenxuan; Z, Weifeng; T, Fangbai; LUO, Y; LIU, Lin; Z, Fang-Jing. Significant acidification in major Chinese croplands. **Science**, v. 327, n. 5968, p. 1008-1010, 2010.

HARTEMINK, A. E Ciência global do solo e soluções regionais. **Geoderma Regional**, v. 5, p.1-3, 2015.

HEBINCK, P.; MTATI, N.; SHACKLETON, C. Mais do que apenas campos: reformulando a desagrarização em paisagens e meios de subsistência. **Journal of Rural Studies**, v. 61, p. 323-334, jul. 2018.

HOMMA, A.K.O; CARVALHO, J.E.U; MENEZES, A.J.E.A. Bacuri: fruta amazônica em ascensão. **Ciência Hoje**, v. 271, pág. 40-45, jun. 2010.

HYUN, J.; KIM, Y.J; KIM, A.; PLANT, A.F; YOO, G. Ecosystem services-based soil quality index tailored to the metropolitan environment for soil assessment and management. **Science of the Total Environment**, v. 820, p. 153301, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: novembro de 2024.

JIMÉNEZ, M. N.; PINTO, J. R.; RIPOLL, M. A.; SÁNCHEZ-MIRANDA, A.; NAVARRO, F. B. Impacto da cobertura morta com palha e fragmentos de rocha na umidade do solo e no crescimento inicial de azinheiras em uma área semiárida. **Catena**, v. 152, p. 198-206, 2017.

JOHNSON, D. L. Uma definição universal de solo. **Quaternário Internacional**. v. 51–52, p. 6-7, 1998.

JORDÃO, H. W. C.; CAMPOS, M. C. C.; FROZZI, J. C.; MANTOVANELLI, B. C.; CUNHA, J. M.; SILVA, D. M. P. Atributos químicos de solos sob ambientes naturais e antropizados na região de Humaitá-AM. In: **Solos Amazônicos: atributos físicos, químicos, erodibilidade e suscetibilidade magnética**. Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

JÚNIOR, M. P. C; CAMPOS, M. C. C; MANTOVANELLI, B. C; FRANCISCON, U.; CUNHA, J. M. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de índio sob cultivo de café Conilon. **Ciência do Café**, v. 12, n. 2, pág. 260-271, 2017.

KARLEN, D. L. et al. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation. **Published in Soil Sci. Soc. V. 61**, p. 4-10, 1997.

KRISTENSEN, E; RABENHORST, M. C. As plantas marinhas com raízes crescem em sedimentos ou solo? Uma avaliação crítica sobre definições, metodologia e comunicação. **Revisões de Ciências da Terra**, 2015.

LAI, L.; KUMAR, S. Uma meta-análise global dos impactos do pastoreio de gado nas propriedades do solo. **PLOS UM**, 2020.

LAL, R.; BRUCE, JP O potencial dos solos agrícolas mundiais para sequestrar C e mitigar o efeito estufa. **Ciência e Política Ambiental**, v. 177-185, 1999.

LAL, Rattan. Soil health and carbon management. **Food and Energy Security**, v. 5, n. 4, p. 212–222, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/fes3.96>. Acesso em: 22 nov. 2024.

LANGE, Markus et al. A diversidade de plantas aumenta a atividade microbiana do solo e o armazenamento de carbono do solo. **Nature Communications**, v. 6, p. 6707, 2015.

LAPOLA, D. M.; PINHO, P.; BARLOW, J.; ARAGÃO, L. E. O. C.; BERENGUER, É.; CARMENTA, R.; LIDDY, H. M.; SEIXAS, H.; SILVA, C. V. J.; SILVA-JÚNIOR, C. H. L.; ALENCAR, A. A. C.; ANDERSON, L. O.; ARMENTERAS, D.; BROVKIN, V.; CALDERS, K.; CÂMARAS, J.; CHINI, L.; COSTA, M. H.; FARIA, B. L.; FEARNSIDE, P. M.; FERREIRA, J.; GATTI, L.; GUTIÉRREZ-VÉLEZ, V. H.; HAN, Z.; HIBBARD, K.; KOVEN, C.; LOURENÇO, P.; PONGRATZ, J.; PORTELA, B. T. T.; ROUNSEVELL, M.; RUANE, A. C.; SCHALDACH, R.; SILVA, S. S.; RANDOW, C. V.; WALKER, W. S. Os motores e impactos da degradação da floresta amazônica. **Ciência**, vol. 379, ed. 6630, 2023.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. Conservation and enhancement of soil quality. In: INTERNATIONAL BOARD FOR SOIL RESEARCH AND MANAGEMENT. **Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World**, n. 12, Bangkok: IBSRAM, 1991.

LI, Y.; LI, Y.; DUAN, X.; CAI, Z.; LI, Y.; HE, B.; YIN, L. Análises de trade-off entre provisão de alimentos e serviço de conservação do solo do Programa Grãos para Verde em Área Montanhosa. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 12, n. 1, p. 43-53, 2024.

LIN, Kuan-Ting; PAN, Shu-Yuan; YUAN, Mei-Hua; ZHANG, Yi-Ting; GUO, Horng-Yuh. Synergies between rice production security and soil-related ecosystem services: From field observations to policy implementations. **Agricultural Systems**, v. 224, p. 104256, 2025.

LIMA, A. F. L de.; CAMPOS, M. C. C.; MARTINS, T. S.; BRITO, W. B. M.; SILVA, L. I.; PAULA, E. M. B. Influência do manejo e relevo nos atributos do solo e acúmulo de biomassa em áreas convertidas em pastagens na Amazônia Brasileira. In: **Solos Amazônicos: atributos físicos, químicos, erodibilidade e suscetibilidade magnética**. Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

LIMA, A. F. L de; CAMPOS, M. C. C; MARTINS, T. S; SILVA, G. A; BRITO, W. B. M; SANTOS, L. A. C dos; OLIVEIRA, I. A de; CUNHA, J. M da. Atributos químicos do solo em áreas em conversão de floresta para pastagem no sul da Amazônia brasileira. **Relatórios Científicos**, v. 12, 2022.

LIU, Enke; YAN, Changrong; MEI, Xurong; HE, Wenqing; BING, So Hwat; DING, Linping; LIU, Qin; LIU, Shuang; FAN, Tinglu. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China. **Geoderma**, v. 158, p. 173–180, 2010.

LIU, J.; LIU, M.; WU, M.; JIANG, C.; CHEN, X.; CAI, Z.; WANG, B.; ZHANG, J.; ZHANG, T.; LI, Z. Soil pH rather than nutrients drive changes in microbial community following long-term fertilization in acidic Ultisols of southern China. **Journal of Soils and Sediments**, v. 18, p. 1853–1864, 2019.

LUCAS-BORJA, M.E; ZEMA, D.A; PLAZA-ÁLVAREZ, P.A; ZUPANC, V.; BAARTMAN, J.; SAGRA, J.; GONZÁLEZ-ROMERO, J.; MOYA, D.; HERAS, J. Efeitos de diferentes usos da terra (terras agrícolas abandonadas, agricultura intensiva e floresta) nas propriedades hidrológicas do solo no sul da Espanha. **Água**, v. 11, pág. 503, 2019.

MACEDO, MCM; ZIMMER, AH; KICHEL, AN **Degradação e alternativas de recuperação e renovação de pastagens**. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, p. 4, 2000.

MALLARINO, AP; OYARZABAL, ES; HINZ, PN Interpretando relações dentro do campo entre rendimentos de culturas e variáveis do solo e da planta usando análise fatorial. **Precision Agriculture**, v. 1, p. 15–25, 1999.

MANTOVANELLI, B. C.; CAMPOS, M. C. C.; ALHO, L. C.; FRANCISCON, U.; NASCIMENTO, M. F.; SANTOS, L. A. C. dos. Distribuição espacial dos componentes da acidez do solo em área de campo natural na região de Humaitá, Amazonas. **Revista de Ciências Agroambientais**, Alta Floresta, MT: UNEMAT, v. 14, n. 1, p. 01-09, 2016.

MARION, L.F; SCHNEIDER, R.; CHERUBIN, M.R; COLARES, G.S; WIESEL, P.G; COSTA, A.B; LOBO, E.A Desenvolvimento de índice de qualidade do solo para avaliação de sistemas de cultivo agrícola no Sul do Brasil. **Soil & Tillage Research**, v. 105293, 2022.

MARTINS, T.S; CUNHA, J.M da; BRITO, W.B.M; SANTOS, R.V dos; LIMA, A.F.L de; SOUZA, F.G de; CAMPOS, M.C.C; BRITO FILHO, E.G de; OLIVEIRA, F.P de. Distribuição espacial e anisotrópica de atributos químicos do solo em agroecossistemas e floresta nativa em Canutama, sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 3, pág. 1629-1646, 2023.

MATOS, F. O.; CASTRO, R. M. S.; RUIVO, M. L. P.; MOURA, Q. L. Teores de nutrientes do solo sob sistema agroflorestal manejado com e sem queima no Estado do Pará. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 3, p. 257-266, 2012.

MCBRATNEY, A. B.; HARTEMINK, A. E. Define soil. **Soil Security**. v. 14, 2024.

MEA (Millennium Ecosystem Assessment). **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis**. Washington, DC: Island Press, 2005.

MEDEIROS, F.B; MARCATTO, F.S; SILVEIRA, H.; NÓBREGA, M.T Avaliação da estabilidade de agregados e vulnerabilidade à erosão em Araruna, noroeste do Paraná-Brasil. **Caderno de Geografia**, v. 55, 2018.

MENDES, I. C.; SOUZA, L. M.; SOUSA, D. M. G.; LOPES, A. A. C.; REIS-JUNIOR, F. B.; LACERDA, M. P. C.; MALAQUIAS, J. V. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied soil ecology**, Amsterdã, v. 139, p. 85-93, 2019.

MENDES, L. W; TSAI, S.M; NAVARRETE, A.A; HOLLANDER, M. de; VAN VEEN, J. A; KURAMAE, E. E Microbioma transmitido pelo solo: vinculando diversidade à função. **Ecologia Microbiana**, v. 70, p. 255–265, 2015.

MERTZ, O.; WADLEY, R. L.; CHRISTENSEN, A. E. Estratégias de uso local da terra em um mundo globalizado: agricultura de subsistência, culturas comerciais e diversificação de renda. **Agricultural Systems**, v. 85, n. 3, p. 209-215, set. 2005.

MERIDA, V. E.; COOK, D.; ÓGMUNDARSON, O.; DAVÍÐSDÓTTIR, B. Ecosystem services and disservices of meat and dairy production: A systematic literature review. **Ecosystem Services**, v. 58, p. 101494, dez. 2022.

MILLER, J. O. Soil pH Affects Nutrient Availability. Fact Sheet FS-1054. **University of Maryland Extension**, 2021.

MIRGHAED, Fazlolah Ahmadi; SOURI, Bubak. Análise espacial da qualidade do solo por meio de padrões de paisagem na Bacia do Rio Shoor, Sudoeste do Irã. **Catena**, v. 211, 2022.

MOREIRA, A.; FAGERIA, N. K. Soil Chemical Attributes of Amazonas State, Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 40, n. 17-18, p. 2912-2925, 2009.

MORGANTE, C.V; LIMA, A.M; SANTOS, J.F; PEREIRA, T.S; OLIVEIRA, M.R; SILVA, E.L Maniçoba para ovinos e caprinos - rendimento forrageiro, conservação e alimentação. **Ciência Rural**, v. 50, n. 8, 2020.

MOURA, E. G. de; SOUSA, R. M. de; CAMPOS, L. S.; CARDOSO-SILVA, A. J.; MOONEY, S. J.; AGUIAR, A. das C. F. A utilização mais eficiente dos serviços ecossistêmicos poderia melhorar os indicadores de qualidade do solo para permitir a intensificação sustentável da agricultura familiar na Amazônia? **Ecological Indicators**, v. 127, p. 107723, 2021.

NABIOLLAHI, K.; TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R.; KERRY, R.; MORADIAN, S. Avaliação dos índices de qualidade do solo para terras agrícolas afetadas pelo sal na província do Curdistão, Irã. **Indicadores Ecológicos**, v. 83, p. 482–494, 2017.

NASCIMENTO, D. B; LOPES, M. L. S; IZIDRO, J. L. P. S; BEZERRA, R. C. A; GÓIS, G. C; AMARAL, T. N. E de; DIAS, W. da S.; BARROS, M. M. L de; OLIVEIRA, A. R da S.; SOBRINHO, J. L. de F.; COELHO, J.J. Ciclagem de nitrogênio, fósforo e potássio em ecossistemas de pastagem. **Ciência Animal Brasileira**, v. 25, 2024.

NASUKAWA, H.; TAJIMA, R.; PEREIRA, MCF; PEDRO, JA; NAKAMURA, S.; FUKUDA, M.; KOIDE, J.; OYA, T.; HOMMA, K. Estratégias de gestão para agricultura

regenerativa baseadas na avaliação da fertilidade do solo no norte de Moçambique. **Geoderma Regional**, v. e00912, 2025.

NEAL, AL; BACQ-LABREUIL, A.; ZHANG, X.; CLARK, IM; COLEMAN, K.; MOONEY, SJ; RITZ, K.; CRAWFORD, JW **Solo como um fenótipo composto estendido do metagenoma microbiano**. *Relatórios Científicos*, v. 10, 2020.

NERI-NUMA, I.A, SANCHO, R.A.S, PEREIRA, A.P.A, & PASTORE, G.M. Pequenas frutas silvestres brasileiras: nutrientes, compostos bioativos, propriedades promotoras da saúde e interesse comercial. **Pesquisa Alimentar Internacional**, v. 103, p. 345–360, 2018.

NEVES NETO, A. F.; SILVA, A. P.; NORONHA, N. C.; CERRI, C. C. Sistemas de manejo do solo na recuperação de uma pastagem degradada em Rondônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 232-241, 2013.

NEVES, L. C; SILVA, P. M. C; ROBERTO, S. R; LEÃO, P. M. R; CARVALHO, L.B.; SILVA, B. C. L; CISNEROS-ZEVALLOS, L. Maturidade fisiológica e práticas de pomar baseadas em feridas, influência no conteúdo antioxidante e na atividade metabólica de duas espécies de açaí na colheita e durante o armazenamento. **Química de Alimentos**, v. 382, 15 jul. 2022, pág. 132279.

NORFLEET, M.L.; DITZLER, C.A.; PUCKETT, W.E.; GROSSMAN, R.B.; SHAW, J.N. Soil quality and its relationship to pedology. **Soil Science**, v.168, n. 3, p. 149-155, 2003.OK

NORTH, G. C.; FRELICH, L. E.; GUTHMANN, A. E. As comunidades de macrofauna do solo variam de acordo com o tipo de uso da terra e as condições ambientais no ecossistema Serengeti-Mara. **Applied Soil Ecology**, v. 206, p. 105897, 2025.

NUNES, JF; CAMPOS, LS; AGUIAR, ACF; MOONEY, SJ; PIMENTEL, KA; MOURA, EG Entendendo como o manejo pode prevenir a manipulação dos solos estruturalmente frágeis da periferia amazônica. **Revista Europeia de Agronomia**, v. 153, pág. 127037, 2024.

NUMATA, I.; CHADWICK, O.A; ROBERTS, D.A; SCHIMEL, J.P; SAMPAIO, F.F; LEONIDAS, F.C; SOARES, J.V Variação temporal de nutrientes no solo e na vegetação de pastagens pós-florestais em função da ordem do solo, idade da pastagem e manejo, Rondônia, Brasil. **Agricultura, Ecossistemas e Meio Ambiente**, v. 118, p. 159–172, 2007.

NYAWIRA, S. S.; HARTMAN, M. D.; NGUYEN, T. H.; MARGENOT, A. J.; KIHARA, T.; PAUL, B. K.; WILLIAMS, S.; BOLO, P.; SOMMER, R. Simulação de carbono orgânico do solo em sistemas baseados em milho sob manejo agrônomico melhorado no oeste do Quênia. **Soil & Tillage Research**, v. 211, p. 105000, 2021.

OELMANN, Y.; LANGE, M.; LEIMER, S.; ROSCHER, C.; ABURTO, F.; ALT, F.; BANGE, N.; BERNA, D.; BOCH, S.; BOEDDINGHAUS, RS; e outros. A biografia acima e abaixo do solo estreitamente conjuntamente o ciclo do P em pastagens agrícolas. **Nature Communications**, v. 12, 2021.

OLIVEIRA, S. M. de; MENEZES, A. J.; PATRÍCIO, S. J.; FROZZI, C. J.; GOMES, M. J. Variabilidade Temporal do Efluxo de CO₂ em Áreas de Floresta Secundária e Campo Natural na Região Sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 3, p. 1466-1480, 2023.

PALM, C. A.; SWIFT, M. J.; WOOMER, P. L. Soil biological dynamics in slash-and-burn agriculture. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 58, p. 61-74, 1996.

PETTER, F. A. *et al.* Cultivation of soybeans and cover crops as low carbon agriculture strategy: CO₂ sequestration and increase in carbon stocks in a southern Amazon Oxisol. **Geoderma Regional**. 11, p. 53–61, 2017.

Projeto MapBiomas – Coleção 9 Destaques do Mapeamento Anual de Cobertura e Uso da Terra Bioma Amazônia, acessado em 05 de janeiro de 2025 através do link:https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2024/10/Factsheet-Amazonia_C9_01.10_v2.pdf

Projeto MapBiomas – Mapeamento Anual de Cobertura e Uso da Terra do Brasil - Coleção 7, acessado em 08 de setembro de 2024 através do link: https://brasil.mapbiomas.org/wpcontent/uploads/sites/4/2023/11/MapBiomas_Pastag_em_2022_30_11.pdf-.pdf

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024.

RASMUSSEN, L. V.; CHRISTENSEN, A. E.; DANIELSEN, F.; DAWSON, N.; MARTIN, A.; MERTZ, O.; SIKOR, T.; THONGMANIVONG, S.; XAYDONGVANH, P. From food to pest: Conversion factors determine switches between ecosystem services and disservices. **Ambio**, v. 46, p. 173–183, 2017.

RIBEIRO, F. W; RODRIGUES, C. C; ARAÚJO, M. S; SILVA, A. C; MATOS, F. S Custo de produção e rentabilidade econômica do cultivo da mandioca em Goiás. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 1, pág. 104-110, 2019.

ROBIN, P.; MOREL, C.; VIAL, F.; LANDRAIN, B.; TOUDIC, A.; LI, Y.; AKKAL-CORFINI, N. Efeito de três tipos de carbono orgânico exógeno na matéria orgânica do solo e nas propriedades físicas de um tecnossolo arenoso. **Sustainability**, v. 10, n. 4, p. 1146, 2018.

ROCHA, F.I; JESUS, C.E; TEIXEIRA, W.G; LUMBRERAS, J.F; CLEMENTE, E.P; MOTTA, P.E.F; BORSANELLI, A.C; DUTRA, I.S; OLIVEIRA, A.P. O tipo de solo determina a magnitude das mudanças na fertilidade do solo pela conversão de floresta em pastagem na Amazônia Ocidental. **Ciência do Meio Ambiente Total**, v. 856, parte 1, p. 158955, 2023.

RUIZ-NAVARRO, A; BARBERÁ, G. G; GARCÍA-HARO, J.; ALBALADEJO, J. Efeito da resolução espacial no controle paisagístico da fertilidade do solo em área semiárida. **Revista de Solos e Sedimentos**, v. 12, p. 471–485, 2012.

SANTOS, C. A; SILVA, J. T; OLIVEIRA, P. R. Propriedades antioxidantes do açaí (*Euterpe oleracea*) na síndrome metabólica. **Revista Brasileira de Tecnologia de Alimentos**, v. 22, e2018054, 2019.

SANTOS-LESLEY; ANGÉLICA, R; PAZ, S. Investigação de resíduos de commodities minerais com base na alcalinidade, solubilidade e outros aspectos físico-químicos visando o manejo de solos ácidos amazônicos. **Journal of Environmental Management**, v. 335, p. 117558, 2023.

SANTOS-SILVA, L.; ROQUE, W. F.; MOURA, J. M. de; MELLO, I. S.; CARVALHO, L. A. L. de; PINHEIRO, D. G.; BOUZAN, R. S.; BRESCOVIT, A. D.; ANDRADE, R. L. T. de; SILVA, G. F. da; BATTIROLA, L. D.; SOARES, M. A. Metais tóxicos em solo amazônico modificam

comunidade bacteriana associada a Diplopoda. **Science of the Total Environment**, v. 955, p. 176915, 2024.

SÁTIRO, J. N. de O.; MOTTA, A. C. V.; DEMETRIO, W. C.; SEGALLA, R. F.; CREMONESI, M. V.; ARAÚJO, E. M.; FALCÃO, N. P. de S.; MARTINS, G. C.; MUNIZ, A. W.; TAUBE, P. S.; REBELLATO, L.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. C. de; TEIXEIRA, W. G.; NEVES, E. G.; LIMA, H. P.; CHOQUE, M. P.; KILLE, P.; CUNHA, L.; Rede TPI; BROWN, G. G. Disponibilidade de micronutrientes em terras pretas amazônicas e solos adjacentes. **Geoderma**, v. 395, p. 115072, 2021.

SASANIFAR, S.; ALIJANPOUR, A.; SHAFIEI, AB; RAD, JE; MOLAEI, M.; AZADI, H. Política de proteção florestal: lição aprendida na reserva da biosfera de Arasbaran no noroeste do Irã. **Política de Uso do Solo**, v. 87, p. 104057, 2019.

SEDECTI. Produto Interno Bruto – PIB do Amazonas, relatório 1º trimestre 2023. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, Ciência, Tecnologia e Inovação, 2023.

SENA, V. G. L.; MOURA, E. G. de; MACEDO, V. R. A.; AGUIAR, A. C. F.; PREÇO, A. H.; MOONEY, S. J.; CALONEGO, J. C. **Serviços ecossistêmicos para intensificação da agricultura, com ênfase no aumento da eficiência ecológica do uso do azoto**. *Ecosphere*, v. 11, n. 2, 2020.

SEÓ, H. L. S.; MACHADO FILHO, L. C. P.; BRUGNARA, D. Rationally Managed Pastures Stock More Carbon than No-Tillage Fields. **Frontiers in Environmental Science**, v. 5, p. 1-8, 2017.

SENJOBI, B.A; OGUNKUNLE, A.O. Efeito de diferentes tipos de uso da terra e suas implicações na degradação da terra e produtividade no estado de Ogun, Nigéria. **Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development**, v. 3, n. 1, p. 7-18, jan. 2011.

SHACKLETON, C. M.; RUWANZA, S.; SINASSON SANNI, G. K.; BENNETT, S.; DE LACY, P.; MODIPA, R.; MTATI, N.; SACHIKONYE, M.; THONDHLANA, G. Unpacking Pandora's Box: understanding and categorising ecosystem disservices for environmental management and human wellbeing. **Ecosystems**, v. 19, p. 587–600, 2016.

SHABANPOUR, M.; DANESHYAR, M.; PARHIZKAR, M.; LUCAS-BORJA, ME; ZEMA, D.A. Influência das culturas nas propriedades do solo em terras agrícolas do norte do Irã. **Ciência do Meio Ambiente Total**, v. 711, p. 134694, 2020.

SHUKLA, M. K.; LALA, R.; EBINGER, M. Determinação de indicadores de qualidade do solo por análise fatorial. **Soil & Tillage Research**, v. 87, p. 194–204, 2006.

SILESHI, G.W, Mafongoya, P.L, Nath, A.J. Sistemas agroflorestais para melhorar a reciclagem de nutrientes e a fertilidade do solo em terras degradadas. Em: Dagar, JC, Gupta, SR, Teketay, D. (eds) **Agroforest Syst**, 2020.

SILVA, F. L.; SILVA, M. H. M.; OLIVEIRA, J. E. S.; LÓPEZ, A. M.; PIERANGELI, M. A. P. Fertilidade e estoque de carbono em ambientes de pastagem e floresta no sul da Amazônia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 1, e270888, 2024.

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, 2018.

SIVIERO, A.; SCHOTT, B. Caracterização botânica e agronômica da coleção de mandioca da Embrapa Acre. *Revista Raízes e Amidos Tropicais*, v. 31-41, 2011.

SIX, J.; PAUL, EA; PAUSTIAN, K. **Mecanismos de estabilização da matéria orgânica do solo: Implicações para a saturação de C dos solos.** *Plant and Soil*, v. 241, p. 155–176, 2002.

SOARES, Filho, C. V., Monteiro, F. A. & Corsi, M. Recuperação de pastagens degradadas de *Brachiaria decumbens*. 1. Efeito de diferentes tratamentos de fertilização e manejo. **Pasturas Tropicais**, 14, 1-6, 1992.

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; CUNHA, J. M.; SANTOS, L. A. C.; FONSECA, J. S.; SOUZA, Z. M.; Atributos físicos do solo em áreas sob diferentes sistemas de usos na região de Manicoré, AM. **Revista Ciência Agrária**, v. 59, n. 1, p. 9-15, 2016.

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, p. 33– 38, 2013.

SOUZA, E. S.; FERNANDES, A. R.; BRAZ, A. M. S.; OLIVEIRA, F. J.; ALLEONI, L. R. F.; CAMPOS, M. C. C. Physical, chemical and mineralogical attributes of a representative group of soils from the Eastern Amazon, Brazil. **Soil discuss**. 2018.

SOUZA, W. S dos; SOARES, S.C; HOMEM, B. G. C; LIMA, Í. B. G; BORGES, L. P. C; CASAGRANDE, D. R; REZENDE, C. P; PEREIRA, J. M; PINHEIRO, E. F. M; PEREIRA, M. G; ALVES, B. J. R; URQUIAGA, S; BODDEY, R. M. O sequestro de carbono do solo em pastagens de leguminosas e gramíneas fertilizadas com N ou erros depende do tipo de solo e do uso anterior da terra. **Geoderma Regional**, v. 39, 2024.

STRAFFELINI, E.; LUO, J.; TAROLLI, P. As alterações climáticas estão a ameaçar as pastagens de montanha e os seus serviços ecossistêmicos culturais. **CATENA**, v. 237, p. 107802, 2024.

SULIEMAN, S.; MÜHLING, K. H. Utilização de fósforo orgânico do solo como uma abordagem estratégica para agricultura sustentável. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 184, n. 2, p. 145–160, 2021.

TÁVORA, GSG; TURETA, APD; SILVA, AS; SIMÕES, BFT; NEHREN, U. Trade-offs e sinergias em paisagens agrícolas: serviços ecossistêmicos relacionados ao solo na Mata Atlântica. **Meio Ambiente e Sustentabilidade**.v. 16, pág. 100205, 2022.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, p. 573, 2017.

THOMAZ, Edivaldo L.; NUNES, Dorisvalder D.; WATANABE, Michel. Effects of tropical forest conversion on soil and aquatic systems in southwestern Brazilian Amazonia: A synthesis. **Environmental Research**, v. 183, 2020.

TROIAN, D.; ROSSET, J. S.; MARTINS, L. F. B. N.; OZÓRIO, J. M. B.; CASTILHO, S. C. P.; MARRA, L. M. Carbono orgânico e estoque de carbono do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 13, n. 4, p. 1447-1469, 2020.

VASU, Duraisamy; TIWARY, Pramod; CHANDRAN, Padikkal. A novel and comprehensive soil quality index integrating soil morphological, physical, chemical, and biological properties. *Soil & Tillage Research*, v. 244, p. 106246, 2024.

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

VISSCHER, A. M; CHAVEZ, E.; CAICEDO, C.; TINOCO, L.; PULLEMAN, M. Indicadores biológicos de saúde do solo são sensíveis ao manejo de árvores de sombra em um cacauero jovem (*Theobroma cacao*). **Geoderma Regional**, 2024.

WADE, J.; CULMAN, SW; GASCH, CK; LAZCANO, C.; MALTAIS-LANDRY, G.; MARGENOT, AJ; MARTIN, T. K; POTTER, TS; ROPER, WR; RUARK, MD; SPRUNGER, C. D; WALLENSTEIN, M. D. Rigoroso, empírico e quantitativo: um pipeline proposto para avaliações da saúde do solo. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 170, 2022.

YU, H.; DING, W.; CHEN, Z.; ZHANG, H.; LUO, J.; BOLAN, N. Acúmulo de componentes orgânicos de C no solo e agregados. **Relatórios Científicos**, v. 5, art. 13804, 2018.

ZARATE-SALAZAR, J. R; SOUZA, R. F da S.; BEZERRA, F. A; SILVA, D. M. P da; CAMPOS, M. C. C; CUNHA, J. M da; PARRA, JÁS; SOUZA, Z. M de. Primeira aproximação dos limites críticos da qualidade do solo em sistemas de uso da terra na Amazônia brasileira. **Catena**, v. 247, pág. 108476, 2024.

ZENERO, M. D. O.; SILVA, L. F. S.; CASTILHO, S. C. P.; VIDAL, A.; GRIMALDI, M.; COOPER, M. Caracterização e Classificação de Solos sob Floresta e Pastagem em um Projeto Agroextrativista na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016.

ZHOU, Q.; KEITH, D.M; ZHOU, X.; CAI, M.; CUI, X.; WEI, X.; LUO, Y. Comparando as características de retenção de água de camadas de serapilheira de folhas largas, coníferas e mistas em uma região cárstica. **Mountain Research and Development**, v. 38, n. 3, p. 220-229, 2018.

ZHANG, J; YANG, H; WANG, J; TIAN, D; LI, Y; HE, N; NIU, Shuli. Soil and climate determine differential responses of soil respiration to nitrogen and acid deposition along a forest transect. **Science of The Total Environment**, v. 754, p. 142361, 2021.

ZHANG, W.; RICKETTS, T. H.; KREMEN, C.; CARNEY, K.; SWINTON, S. M. Serviços ecossistêmicos e desserviços à agricultura. **Ecological Economics**, v. 64, n. 2, p. 253-260, 2018.