

DENISVALDO ARTUR DE MEIRELES

**QUALIDADE DE LATOSSOLO NA CHAPADA DO ARARIPE EM FUNÇÃO
DA MUDANÇA NO USO DA TERRA**

RECIFE
PERNAMBUCO - BRASIL
AGOSTO – 2025

DENISVALDO ARTUR DE MEIRELES

QUALIDADE DE LATOSSOLO NA CHAPADA DO ARARIPE EM FUNÇÃO DA
MUDANÇA NO USO DA TERRA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Doutor em Ciências Florestais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire

RECIFE
PERNAMBUCO - BRASIL
AGOSTO – 2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Auxiliadora Cunha – CRB-4 1134

M499q Meireles, Denisvaldo Artur de.
Qualidade de latossolo na chapada do Araripe em função da mudança no uso da terra / Denisvaldo Artur de Meireles. – Recife, 2025.
97 f.; il.

Orientador(a): Maria Betânia Galvão dos Santos Freire.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências e anexo(s).

1. Caatinga. 2. Solo - Uso. 3. Serviços ambientais. 4. Matéria orgânica do solo 5. Redução de gases do efeito estufa. I. Freire, Maria Betânia Galvão dos Santos, orient.
II. Título

CDD 634.9

DENISVALDO ARTUR DE MEIRELES

QUALIDADE DE LATOSSOLO NA CHAPADA DO ARARIPE EM FUNÇÃO DA
MUDANÇA NO USO DA TERRA

Data: 29/08/2025

Banca examinadora

Prof. Dr. Renisson Neponuceno de Araújo Filho
(Dep. de Tecnologia Rural/UFRPE)

Profa. Dra. Ane Cristine Fortes da Silva
(Dep. de Ciências Agronômicas e Florestais/UFERSA)

Dr. Felipe José Cury Fracetto
(Dep. de Agronomia - PPGCS/UFRPE)

Dr. Gabriel Henrique Máximo Clarindo Silva
(Dep. de Agronomia - PPGCS/UFRPE)

Orientador:

Profa. Dra. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire
(Orientadora- Departamento de Agronomia/UFRPE)

RECIFE
PERNAMBUCO - BRASIL
AGOSTO – 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, porque é dele que vem toda a minha força e motivação para seguir nessa jornada e todas que enfrentei durante a minha vida pessoal e acadêmica.

A minha família: meu pai (Derivaldo), minha mãe (Sônia) e minha irmã (Danúbia) que estiveram e estão presentes em todos os momentos da minha vida, sempre me ajudando e motivando para concluir essa etapa. Quero acrescentar também minha sobrinha, que está sendo gerada pela minha irmã e que vou sempre amar e ensinar a seguir o caminho do tio que já a ama demais mesmo sem o conhecer.

A minha noiva Daliane, que foi uma das coisas mais lindas que Deus me apresentou durante o doutorado, e se não fosse essa jornada, talvez nunca tivesse encontrado o verdadeiro significado de companheirismo.

Aos amigos pessoais que sempre me apoiaram, e deixaram meus dias mais leves quando precisava diminuir a tensão com as atividades acadêmicas. Assim como aos colegas do PPGCF que encontrei em Recife e que levarei para minha vida, pois eles foram uma verdadeira rede de apoio em uma missão para mim inovadora e longe de casa. A minha querida Universidade Federal Rural do Pernambuco (UFRPE) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. Que me acolheu e me deu todo suporte necessário para chegar à conclusão do doutorado.

A minha excelentíssima orientadora Betânia Freire, um exemplo de pesquisadora a ser seguido. Sempre ao meu lado me auxiliando durante todo o doutorado com maestria. A equipe que compõe o Lab. de química do solo: Professor Jean, Paulo, Pedro. Equipe responsável por todo apoio durante minhas análises e o sucesso da minha tese.

Ao Instituto agrônômico do Pernambuco (IPA), que ofereceu todo suporte na coleta do material para as análises, assim como toda a logística em Araripina-PE. Lembrando sempre de todos os funcionários locais que me ajudaram nas atividades de campo.

“Quanto mais eu estudo a natureza, mais me maravilho com a obra do
Criador.”

Louis Pasteur

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	13
1.1. Hipóteses	15
1.2. Objetivos	15
1.2.1. Geral	15
1.2.2. Específicos	15
2. REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1. Florestas Tropicais Secas	16
2.2. Atributos dos Solos em Floresta Tropical Seca	17
2.3. Estoque de Carbono no Solo em FTS	18
2.4. Atividade Biológica do Solo	20
2.5. Impactos com a Mudança do Uso do Solo em FTS	21
Referências Bibliográficas	23
3. MUDANÇAS NO USO DA TERRA MODIFICAM ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO EM UMA FLORESTA TROPICAL SECA BRASILEIRA	29
Resumo	29
3. LAND USE CHANGES MODIFY THE PHYSICAL, CHEMICAL, AND BIOLOGICAL ATTRIBUTES OF SOIL IN A BRAZILIAN DRY TROPICAL FOREST	30
Abstract	30
3.1. Introdução	31
3.2. Material e Métodos	32
3.2.1. Caracterização e Histórico de Uso das Áreas	32
3.2.2. Amostragem do solo	35
3.2.3. Atributos físicos	36
3.2.4. Atributos químicos	37
3.2.5. Atributos biológicos	37
3.2.6. Análise dos Dados	38
3.3. Resultados e Discussão	38
3.3.1. Atributos Físicos do Solo	38
3.3.2. Atributos Químicos do Solo	41
3.3.3. Atributos Biológicos do Solo	47
3.3.4. Relações entre os Atributos do Solo	52

3.4. Conclusões	55
Referências Bibliográficas	56
4. CARBONO ORGÂNICO E ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO EM DIFERENTES USOS DA TERRA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	62
Resumo	62
4. ORGANIC CARBON AND SOIL QUALITY INDEX IN DIFFERENT LAND USES IN THE BRAZILIAN SEMI-ARID REGION	63
Abstract.....	63
4.1. Introdução	64
4.2. Materiais e Métodos	65
4.2.1. Caracterização e histórico de uso das áreas	65
4.2.2. Atributos do solo	68
4.2.3. Determinação do índice de qualidade do solo (IQS)	69
4.2.3. Análises de dados	70
4.3. Resultados e Discussão	70
4.3.1. Estoque de carbono no solo	70
4.3.2. Fracionamento do carbono no solo	73
4.3.3. Índices de qualidade do solo.....	78
4.4. Conclusão	82
Referências Bibliográficas	83
5. CONCLUSÃO GERAL	92
ANEXO A. Análise da variância das propriedades físicas do solo sob diferentes sistemas de uso do solo, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade, no município de Araripina (PE)	93
ANEXO B. Análise da variância das propriedades químicas do solo nas camadas de coleta de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade sob diferentes sistemas de uso do solo em dois períodos de amostragem, no município de Araripina (PE)	94
ANEXO C Análise da variância das propriedades biológicas do solo nas camadas de coleta de 0-10 e 10-20 cm de profundidade sob diferentes sistemas de uso do solo em dois períodos de amostragem, no município de Araripina (PE)	95
ANEXO D. Peso das variáveis utilizadas nos índices de qualidade do solo	96
ANEXO E. Valores de função de pontuação e referências para avaliação da qualidade do solo	97

LISTA DE FIGURAS

MUDANÇAS NO USO DA TERRA MODIFICAM ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO EM UMA FLORESTA TROPICAL SECA BRASILEIRA

- Figura 1** – Mapa de localização do Estado de Pernambuco, do município de Araripina e das quatro áreas estudadas, com detalhes da paisagem.....33
- Figura 2** – Pluviosidade mensal (mm) durante o período de coleta de dados, em Araripina – PE, mais precisamente nas áreas de estudo (dentro da área experimental do IPA – Instituto Agrônomo de Pernambuco).....34
- Figura 3** – Densidade do solo (a), das partículas (b), grau de flocculação (c), porosidade total (d), macroporosidade (e) e microporosidade (f) em função dos diferentes sistemas de uso do solo, em Araripina (PE).....39
- Figura 4** – Densidade do solo (a), densidade das partículas (b), grau de flocculação (c), porosidade total (d), macroporosidade (e) e microporosidade (f) no solo, em função da profundidade, em Araripina (PE).40
- Figura 5** – Teores de sódio trocável em função do uso do solo e dos períodos de coleta, nas camadas de 0-10 cm (a), 10-20 cm (b), 20-40 cm (c) e 40-60 cm (d) de profundidade, em Araripina (PE).45
- Figura 6** – Estoque de matéria orgânica por camada do solo nas épocas seca e chuvosa (a) e nos usos do solo (b): VNP (vegetação nativa permanente), EUC (eucaliptos), MAN (mandioca) e REV (revegetação), em Araripina (PE). Letras iguais indicam que não há diferença entre os períodos de coleta (a) e entre os usos do solo (b), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.47
- Figura 7** – Atividade da beta-glicosidase (a, b), quociente metabólico (c, d) e quociente de mineralização (e, f) nas diferentes épocas de coleta do solo de cada camada de profundidade coletada, no município de Araripina.....48
- Figura 8** – Atividade da beta-glicosidase (a, b), quociente metabólico (c, d) e quociente de mineralização (e, f) sob diferentes usos do solo, no município de Araripina.....49
- Figura 9** – Carbono da biomassa microbiana (a, b), Respiração Basal (c, d), Quociente microbiano (e, f), sob diferentes usos do solo, no município de Araripina-PB.51

Figura 10 – Análise de componentes principais com base nas relações entre as propriedades físicas, químicas e biológicas de solo sob diferentes usos e profundidades de coleta, no município de Araripina-PE.	53
Figura 11 – Componentes principais das relações entre as propriedades químicas e biológicas de solo sob diferentes usos e profundidades de coleta, no município de Araripina-PE.....	54

CARBONO ORGÂNICO E ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO EM FTS

Figura 1 – Mapa de localização do município de Araripina-PE, e das áreas estudadas.	66
Figura 2 – Pluviosidade mensal (mm) durante o período de coleta de dados, em Araripina – PE, dados coletados em estação meteorológica adjacente às instalações do IPA (Instituto Agrônomo de Pernambuco).....	67
Figura 3 – Estoque de carbono orgânico por camada do solo nas épocas seca e chuvosa (a) e nos usos do solo (b), em Araripina (PE).	71
Figura 4 – Análise de componentes principais com base nas relações entre as propriedades do solo e as frações do carbono orgânico do solo em diferentes usos, no município de Araripina-PE.....	74
Figura 5 – Análise de componentes principais com base nas relações entre as propriedades do solo e as frações do carbono orgânico do solo sob diferentes usos, no município de Araripina-PE.....	76
Figura 6 – Índices de qualidade geral e das propriedades do solo (a), e suas funções ecossistêmicas (b) avaliadas em diferentes profundidades, no município de Araripina-PE.....	79
Figura 7 – Índices de qualidade geral e das propriedades do solo (a), e suas funções ecossistêmicas (b) avaliadas em diferentes usos do solo, no município de Araripina-PE.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição e histórico das áreas estudadas	34
Tabela 2 – Caracterização granulométrica de um latossolo amarelo em diferentes profundidades e usos do solo em Araripina-PE.....	36
Tabela 3 – Propriedades químicas do solo em função da época de coleta (seca e chuvosa) nas camadas avaliadas, em Araripina (PE)	42
Tabela 4 – Propriedades químicas do solo em função dos diferentes sistemas de uso nas camadas avaliadas, em Araripina (PE).....	44

Meireles, Denisvaldo Artur de. **Qualidade de Latossolo na Chapada do Araripe em função da mudança no uso da terra**. 2025. Orientadora: Maria Betânia Galvão dos Santos Freire.

RESUMO

Em ecossistemas semiáridos, as mudanças no uso e manejo da terra desencadeiam transformações profundas nas propriedades do solo e nos estoques de carbono, comprometendo funções ecossistêmicas essenciais e reduzindo a resiliência desses ambientes frente às mudanças climáticas. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo analisar de forma integrada os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, bem como os estoques e a dinâmica do carbono orgânico, em diferentes sistemas de uso da terra na Chapada do Araripe (Araripina-PE), região semiárida do Brasil. O estudo contemplou quatro sistemas: vegetação nativa preservada (VNP), plantio de eucalipto (EUC), cultivo convencional de mandioca (MAN) e área em processo de revegetação (REV). O solo foi classificado como LATOSSOLO AMARELO Distrófico de textura franco-arenosa, e as amostragens foram realizadas em duas estações climáticas (seca e chuvosa) e em quatro profundidades (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm). As avaliações abrangeram indicadores físicos (granulometria, densidade do solo e das partículas, porosidade e grau de flocculação), químicos (pH, cátions trocáveis, acidez potencial e fósforo disponível) e biológicos (carbono da biomassa microbiana – CBM, respiração basal – RB, quociente microbiano – q_{Mic} , quociente metabólico – q_{CO_2} , quociente de mineralização – q_{Min} e atividade da enzima β -glicosidase). Também foram determinados os teores e estoques de carbono orgânico do solo (COS), visando compreender sua dinâmica em diferentes usos da terra e condições climáticas. Os resultados mostraram que a VNP apresentou menor densidade ($1,25 \text{ Mg m}^{-3}$), maior flocculação ($>60\%$) e maior estabilidade estrutural, confirmando sua relevância para a conservação da qualidade física. O EUC destacou-se pelos maiores valores de fósforo disponível (até $5,0 \text{ mg kg}^{-1}$), CBM ($>300 \text{ mg kg}^{-1}$) e estoques médios de 32 Mg C ha^{-1} (0–20 cm), refletindo o papel da serapilheira e do manejo silvicultural no sequestro de carbono. Em contraste, o sistema de MAN apresentou densidade elevada ($1,50 \text{ Mg m}^{-3}$), perdas superiores a 40% no carbono em relação à VNP e baixa atividade enzimática, evidenciando os efeitos degradantes do manejo intensivo. A REV apresentou resultados intermediários, com incremento de até 20% nos estoques de carbono em relação ao cultivo agrícola, demonstrando potencial de recuperação edáfica. De forma geral, os maiores estoques de carbono foram registrados no período chuvoso (35 Mg C ha^{-1}), associados à menor mineralização da matéria orgânica. A análise multivariada reforçou esses contrastes, indicando que a VNP se associou principalmente a atributos físicos superficiais, como menor densidade ($1,25 \text{ Mg m}^{-3}$) e maior macroporosidade ($>0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), enquanto o EUC correlacionou-se a atributos químicos e biológicos, com destaque para maiores teores de Ca^{2+} ($4,0 \text{ cmolc kg}^{-1}$), Mg^{2+} ($1,0 \text{ cmolc kg}^{-1}$), P disponível (até $5,0 \text{ mg kg}^{-1}$), além de valores superiores de CBM ($>300 \text{ mg kg}^{-1}$) e q_{CO_2} . Esses achados evidenciam a relevância da vegetação nativa e do reflorestamento no fortalecimento da qualidade do solo e na manutenção dos estoques de carbono, contrastando com o efeito degradante do cultivo intensivo de mandioca.

Palavras-chave: Caatinga. Mudanças de uso da terra. Serviços ecossistêmicos. Matéria orgânica do solo. Mitigação climática.

Meireles, Denisvaldo Artur de. **Quality of Oxisol in the Araripe Plateau as a function of land use change**. 2025. Advisor: Maria Betânia Galvão dos Santos Freire.

ABSTRACT

In semi-arid ecosystems, changes in land use and management trigger profound transformations in soil properties and carbon stocks, compromising essential ecosystem functions and reducing the resilience of these environments to climate change. In this context, this study aimed to analyze in an integrated manner the physical, chemical, and biological attributes of the soil, as well as the stocks and dynamics of organic carbon, in different land use systems in Chapada do Araripe (Araripina-PE), a semi-arid region of Brazil. The study covered four systems: preserved native vegetation (VNP), eucalyptus plantation (EUC), conventional cassava cultivation (MAN), and an area undergoing revegetation (REV). The soil was classified as dystrophic yellow latosol with a sandy loam texture, and samples were taken during two climatic seasons (dry and rainy) and at four depths (0–10, 10–20, 20–40, and 40–60 cm). The assessments covered physical indicators (grain size, soil and particle density, porosity, and degree of flocculation), chemical indicators (pH, exchangeable cations, potential acidity, and available phosphorus), and biological indicators (microbial biomass carbon – MBC, basal respiration – BR, microbial quotient – qMic, metabolic quotient – qCO₂, mineralization quotient – q-Min, and β-glycosidase enzyme activity). Soil organic carbon (SOC) contents and stocks were also determined to understand their dynamics under different land uses and climatic conditions. The results showed that VNP had lower density (1.25 Mg m⁻³), higher flocculation (>60%), and greater structural stability, confirming its relevance for the conservation of physical quality. EUC stood out for its higher values of available phosphorus (up to 5.0 mg kg⁻¹), CBM (>300 mg kg⁻¹), and average stocks of 32 Mg C ha⁻¹ (0–20 cm), reflecting the role of litter and silvicultural management in carbon sequestration. In contrast, the MAN system had high density (1.50 Mg m⁻³), losses of more than 40% in carbon compared to VNP, and low enzymatic activity, evidencing the degrading effects of intensive management. REV showed intermediate results, with an increase of up to 20% in carbon stocks compared to agricultural cultivation, demonstrating soil recovery potential. In general, the highest carbon stocks were recorded in the rainy season (35 Mg C ha⁻¹), associated with lower mineralization of organic matter. Multivariate analysis reinforced these contrasts, indicating that VNP was mainly associated with surface physical attributes, such as lower density (1.25 t m⁻³) and higher macroporosity (>0.15 m³ m⁻³), while EUC correlated with chemical and biological attributes, notably higher Ca²⁺ (4.0 cmolc kg⁻¹), Mg²⁺ (1.0 cmolc kg⁻¹), and available P (up to 5.0 mg kg⁻¹) contents, as well as higher CBM (>300 mg kg⁻¹) and q-CO₂ values. These findings highlight the importance of native vegetation and reforestation in strengthening soil quality and maintaining carbon stocks, contrasting with the degrading effect of intensive cassava cultivation.

Keywords: Caatinga. Land use changes. Ecosystem services. Soil organic matter. Climate mitigation.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A mudança no uso e no manejo da terra é reconhecida como um dos principais vetores de degradação ambiental em escala global, com impactos diretos sobre a qualidade do solo, a dinâmica do carbono e os serviços ecossistêmicos. Esses processos contribuem para o aumento das emissões de dióxido de carbono (CO₂), principal gás de efeito estufa, cuja concentração atmosférica segue em crescimento acelerado (ARAÚJO *et al.*, 2021). Este processo ocasiona aumento no aquecimento global, sendo um dos principais causadores dessa problemática a mudança da paisagem e o manejo inadequado do solo.

A região semiárida brasileira é reconhecida por sofrer impactos negativos da ação antrópica, principalmente, com desmatamento desordenado e conversão da vegetação nativa em áreas agrícolas. Esta mudança no uso da terra diminui a composição arbórea, deixa o solo exposto às condições erosivas e acelera a mineralização do CO₂. Consequentemente, isso desencadeia um aumento progressivo na perda de carbono para a atmosfera (MENEZES *et al.*, 2021). Os impactos causados com a mudança do uso do solo são diversos, afetando as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Esses podem ser intensificados com as condições climáticas da região semiárida. O manejo do solo provoca mudanças nas entradas e saídas de carbono orgânico e sua interação entre solo e atmosfera.

Na Chapada do Araripe (Pernambuco), mais precisamente na Chapada do Araripe, são facilmente encontradas áreas extensas de produção de mandioca, e esta prática aumenta a conversão de áreas de mata nativa em campos de cultivo (REZENDE *et al.*, 2022). Em particular, as atividades de aração e gradagem levam a uma desestabilização de agregados mais intensa, com prejuízos à manutenção da matéria orgânica, além de afetar o regime hídrico, aumentar a erosão do solo, e contribuir para queimadas e outras práticas agrícolas (FILIZOLA *et al.*, 2021), interferindo na estrutura do solo e na ciclagem de nutrientes.

Além dos cultivos agrícolas, o município de Araripina-PE fica localizado no polo gesso do Araripe, em que a atividade de processamento do gesso demanda madeira para uso como fonte energética, potencializando a extração descontrolada da vegetação nativa da caatinga (FONTENELE *et al.*, 2018). Portanto, é vital avaliar

como o uso e o manejo florestal interferem no ambiente, uma vez que o maior aporte de matéria orgânica natural está na serapilheira desses ecossistemas.

Os atributos físicos do solo, como densidade, porosidade e grau de floclulação, controlam processos hidrológicos e estruturais; os atributos químicos, como pH, acidez potencial e cátions trocáveis, determinam a fertilidade e a disponibilidade de nutrientes; e os atributos biológicos, como a biomassa microbiana, a respiração basal e a atividade enzimática, funcionam como indicadores sensíveis da qualidade do solo. Esses três grupos de propriedades estão intrinsecamente ligados aos estoques de carbono orgânico do solo (COS), que representam não apenas um importante indicador de qualidade ambiental, mas também um componente-chave na regulação do ciclo global do carbono (PAGE *et al.*, 2020).

Os ciclos biogeoquímicos desempenham papel fundamental em processos dinâmicos dentro de ecossistemas florestais (VARGAS *et al.*, 2018). Nas áreas de florestas tropicais secas, preservar ou melhorar a qualidade do solo é essencial para garantir a sustentabilidade dessas florestas (BINKLEY & FISHER, 2019). Neste contexto, a manutenção da saúde da matéria orgânica do solo medida pela atividade microbiana e propriedades físicas e químicas é um dos principais atributos de avaliação, para então obter respostas se determinado ambiente possui solos sumidouros ou armazenadores de C. Isso se deve ao fato de a MOS influenciar diretamente na estrutura e aeração, na disponibilidade de água e no ciclo de nutrientes do solo, entre outros aspectos. (BINKLEY & FISHER, 2019).

Portanto, compreender a dinâmica do carbono orgânico nos solos e os impactos das mudanças de uso da terra em diferentes ambientes é fundamental para que determinado ambiente se encaixe dentro de alguma proposta dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, principalmente os envolvidos com mudanças climáticas e manejos sustentáveis, para então propor estratégias de recuperação de áreas semiáridas de ambientes extremos (MENEZES *et al.*, 2021). Nesse sentido, são necessários cada vez mais estudos acerca da dinâmica do C em ambientes semiáridos no Brasil, com foco em mudanças do uso do solo e seus impactos nas propriedades físicas, químicas e biológicas.

1.1. Hipóteses

- i) O solo apresentará melhor performance para os atributos físicos e biológicos na área de vegetação nativa, enquanto as áreas cultivadas com eucalipto e em processo de revegetação terá melhor performance para ambos os atributos, inclusive os químicos. A área com mandioca apresentará os piores valores para os atributos avaliados;
- ii) A conversão de vegetação nativa para cultivo de mandioca ocasiona diminuição nos estoques de carbono no solo, entretanto para o caso da área com eucalipto e em processo de revegetação, esse impacto será menor;
- iii) A conversão de floresta para áreas cultivadas influencia na diminuição da qualidade biológica do solo, pela modificação dos índices q-CO₂, q-mic e q-min;
- iv) O índice de qualidade do solo será maior na área com vegetação nativa, seguida por eucalipto e área de revegetação, com a mandioca apresentando a pior qualidade avaliada. Isso se deverá as condições de manejo de cada uso.

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

Analisar de forma integrada os atributos físicos, químicos e biológicos e os estoques de carbono orgânico em diferentes sistemas de uso da terra no semiárido brasileiro, tomando a Chapada do Araripe (Caatinga) como área de referência, a fim de compreender como a conversão da vegetação nativa afeta a qualidade edáfica, a dinâmica do carbono e o potencial de recuperação em áreas revegetadas.

1.2.2. Específicos

- Avaliar as propriedades físicas e químicas do solo sob diferentes usos: Vegetação nativa preservada (VNP); Plantio de Eucalipto (EUC); Plantio de Mandioca (MAN); Área de revegetação (REV);

- Estimar o estoque de carbono no solo, e nas frações dos ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e huminas, assim como do carbono particulado e associado aos minerais, sob diferentes usos;
- Avaliar a atividade microbiana do solo em função de diferentes usos adotados, por meio da atividade da enzima β -glicosidase e respiração basal;
- Determinar o índice de qualidade das funções e atributos do solo, com base em diferentes usos do solo;
- Observar diferenças entre os períodos climáticos (seco e chuvoso) sobre as propriedades químicas e biológicas do solo, bem como seus estoques de carbono.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Florestas Tropicais Secas

As florestas secas são encontradas em várias partes do mundo, são constituídas por um subtipo de clima seco com um índice de aridez alto (razão entre precipitação e evapotranspiração potencial anuais), estendendo-se por todos os continentes do globo terrestre. As regiões áridas e semiáridas ocupam 1/3 da superfície da terra, abrigando cerca de 1/6 de toda a população do mundo (FERNANDES, 2009; MATALLO JÚNIOR, 2001) e, grande parte dos solos dessas regiões possuem textura arenosa, baixa concentração de carbono orgânico, reduzida capacidade de retenção de água (GARCIA-FRANCO *et al.*, 2018; LAL, 2004).

Parte da vegetação em ambiente semiárido é caracterizada por estepes e está entre os maiores ecossistemas, espalhada predominantemente em áreas continentais de zonas temperadas e, em menor extensão, em zonas subtropicais. A maior estepes temperada do mundo é a da Eurásia, estendendo-se desde o norte da China, a Leste, até à Europa Oriental, a oeste. Outras vegetações semiáridas temperadas importantes são as pradarias da América do Norte, as savanas do sul da África e os pampas semiáridos da América do Sul (GARCIA-FRANCO *et al.*, 2018).

No entanto, a compreensão das florestas secas, tanto do ponto de vista humano como biofísico, é amplamente variada, geograficamente e em termos de disciplinaridade. Quando se trata de florestas tropicais úmidas, os recursos e a gestão sustentável são mais visíveis, porém, tem havido pouca atenção para o estudo de florestas secas (DEXTER *et al.*, 2018).

No Brasil, as florestais secas estão localizadas na região semiárida. De acordo com a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE, 2021), essas áreas possuem 1.335.298 km², ocupando 15% do território nacional e se situam na região nordeste do Brasil e norte de Minas Gerais, com 1.477 municípios situados em dez Estados: Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia, Minas Gerais e Espírito Santo, sendo determinantes na pecuária extensiva e a agricultura de sequeiro (DE SOUZA MEDEIROS *et al.*, 2020).

O bioma predominante na região semiárida brasileira é a Caatinga, sendo o principal representante dos ecossistemas compostos por florestas secas no Brasil. É um bioma altamente susceptível às alterações climáticas, que estão sendo intensificadas nos últimos anos. De acordo com o Primeiro Relatório de Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas, a projeção para regiões onde predomina o bioma Caatinga, é de aumento gradual de temperatura de 1,5 a 2,5 °C e diminuição entre 25% e 35% na precipitação no período de 2041-2070 (SCHMIDT *et al.*, 2018).

O clima da região semiárida é um fator limitante para o aumento dos processos de degradação nesses ambientes. Oliveira e Selva (2019) afirmam que a precipitação pluvial é um atributo essencial ao estudo da erosão, uma vez que sua intensidade e quantidade proferem muito sobre a erosividade e degradação de uma área. Por outro lado, Stan e Sanchez-Azofeifa (2019) explicam que as mudanças climáticas impactam os biomas em todo o mundo, a partir dos aumentos recentes nas perturbações, diminuindo as taxas de recuperação dos ecossistemas e as variações na precipitação e na temperatura, o que interfere diretamente a fenologia da floresta, as taxas e tempos de floração, a fotossíntese, o uso da água e o transporte de nutrientes.

2.2. Atributos dos Solos em Floresta Tropical Seca

As características do solo são definidas por atributos químicos, físicos e biológicos, que exercem papel crucial na definição do crescimento das plantas, na composição das comunidades vegetais e na produtividade de cada espécie (VAN DER PUTTEN *et al.*, 2013; HAN *et al.*, 2021). Com isso, o solo se torna um fator fundamental para a fertilidade e estabilidade nos ecossistemas florestais (LUCAS-BORJA *et al.*, 2018), uma vez que influencia e regula, de forma direta e indireta, os processos biológicos (ZHANG *et al.*, 2019)

Para exemplificar a importância dos atributos do solo, a capacidade de retenção de água no solo é diretamente influenciada pelas suas propriedades físicas e químicas (GUZMAN *et al.*, 2019). Além disso, a densidade do solo exerce um papel crucial nos processos hidrológicos, fundamentais para o fornecimento e armazenamento de água, nutrientes e oxigênio no solo (WANG *et al.*, 2010; KRAINOVIC *et al.*, 2020). A estrutura do solo influi na porosidade, influenciando na condutividade hidráulica, a movimentação de solutos e a retenção de água (ZHANG *et al.*, 2019).

Levando em consideração a granulometria do solo, Zhao et al (2014) afirmam que, geralmente, o carbono orgânico do solo se ajusta facilmente com partículas de solo mais finas (silte e argila) formando complexos organominerais. Por outro lado, quando dispersas, as partículas mais finas promovem a obstrução de poros que leva a baixos valores de permeabilidade. Nesta condição, o carbono orgânico torna-se mais difícil de ser decomposto por microrganismos quando se combina com elas pela baixa oxigenação (HAN *et al.*, 2021).

Em áreas sob clima semiárido, onde a evapotranspiração supera a precipitação e a drenagem é dificultada, o sódio pode se acumular no complexo de troca, provocando a sodificação (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2017). Este processo pode resultar na dispersão de coloides e na diminuição da permeabilidade do solo, dificultando a recuperação de áreas degradadas (MACEDO *et al.*, 2022).

Assim, a análise dos atributos do solo tem sido apontada como uma das ferramentas mais eficientes para monitorar e avaliar os processos de degradação em andamento, uma vez que revela os impactos das práticas de manejo implementadas (SOBUCKI *et al.*, 2019).

2.3. Estoque de Carbono no Solo em FTS

O carbono é o elemento presente em maiores proporções na matéria orgânica do solo e pode ser estocado em solos sob ambientes preservados e bem manejados (PESSÔA *et al.*, 2022). Assim, é importante entender a capacidade que os solos têm de assimilar o carbono proveniente dos diversos tipos de vegetação, promovendo seu acúmulo em profundidade (CHIROL *et al.*, 2025). Isso ocorre sob todos os climas do planeta, no entanto, o sistema natural no semiárido é mais frágil e difícil de ser regenerado quando ocorre a degradação (TOMAZ *et al.*, 2024).

O aumento de carbono no solo é crucial para manter o equilíbrio de carbono entre a atmosfera e o solo. Ao minimizar as emissões de carbono para a atmosfera, consegue-se ajudar a atenuar o aquecimento global e as mudanças climáticas (BEN ALI; SHUKLA, 2024). O carbono do solo pode ser separado em diferentes compartimentos com vários níveis de recalcitrância, cada um decaindo em diferentes taxas (COTRUFO *et al.*, 2019). Estão inclusos nesses reservatórios a matéria orgânica associada aos minerais (MAOM) e o carbono orgânico particulado (POM) (LAVALLEE *et al.*, 2020). A MAOM é formada por carbono orgânico que se estabiliza nos agregados do solo e, geralmente, apresenta um tempo de renovação mais prolongado. Em contrapartida, a POM, composta por matéria orgânica mais recente, passa por um processo de renovação relativamente rápido (YU *et al.*, 2022).

O tempo médio de permanência do carbono orgânico associado a minerais pode oscilar entre 20 e 2000 anos, com uma média global estimada em 396 anos (HECKMAN *et al.*, 2021) e, para o carbono orgânico particulado, foram apresentados valores de 15 a 30 anos (LAVALLEE *et al.*, 2019). Fatores como a textura do solo, temperatura, umidade e a atividade microbiana afetam os tempos de renovação (LAVALLEE *et al.*, 2020).

A quantidade total de carbono presente no primeiro metro de profundidade do solo, estimada em 2200 Pg (petagramas), é composta por dois componentes, mas inter-relacionados: o carbono orgânico (COS) e inorgânico (CIS) do solo. O COS representa uma pequena fração (~5%) do volume da matriz do solo e é originado pela biomassa viva e restos de tecidos vegetais e animais em diferentes estágios de decomposição, além dos subprodutos dos processos microbianos. Também pode incluir fuligem e biochar formados por incêndios naturais e controlados, bem como pela combustão de biomassa e material de detritos. O CIS é composto por carbonatos e bicarbonatos, e que podem ser primários ou litogênicos, originados do intemperismo da rocha que formou o solo, ou secundários ou pedogênicos, formados a partir dos processos que ocorrem no solo (LAL, 2020).

Apesar da capacidade de sequestrar carbono, o solo também pode atuar como um liberador de CO₂ para a atmosfera. Entretanto, isso depende do equilíbrio entre as entradas e saídas desse elemento, diretamente relacionada com a mudança do uso do solo e sua gestão (AMELUNG *et al.*, 2020, SANTOS *et al.*, 2023). Por exemplo, a substituição da vegetação nativa por cultivos agrícolas, geralmente, resulta em perda de carbono do solo, especialmente quando as práticas de manejo diminuem

significativamente a entrada de biomassa ou aceleram a decomposição da matéria orgânica presente no solo (OLIVEIRA *et al.*, 2023).

Em áreas sob clima árido e semiárido, caracterizadas por altas temperaturas, precipitação baixa e irregular, pouca disponibilidade de água superficial, a saúde do solo é comprometida e, conseqüentemente, ocorre baixa diversidade na vegetação (ACOSTA-RANGEL *et al.*, 2019) e o aporte de carbono orgânico ao solo geralmente é menor. Contudo, apesar dessas áreas terem baixos teores de carbono orgânico, são responsáveis por armazenar 16% do carbono total presente nos solos em todo o mundo. Estima-se que as pastagens em ambiente semiárido sequestram cerca de 500 bilhões de toneladas de carbono por ano em escala global (DERAKHSHAN *et al.*, 2022), tornando-se importante no sequestro de carbono do solo.

2.4. Atividade Biológica do Solo

Manter o equilíbrio ambiental é fundamental, e de certa forma isso é possível observando as características populacionais de grupos de organismos específicos. Esses podem ser considerados bioindicadores do grau de alteração ou fragmentação de um ecossistema (CASTRO *et al.*, 2022). O principal papel dos organismos do solo nos ecossistemas está relacionado à decomposição e transformação da matéria orgânica do solo. Uma vez que, nos primeiros 20 cm de profundidade, onde ocorre a maior adição de resíduos orgânicos, os organismos auxiliam para que haja uma maior decomposição deste material que, posteriormente, será transformado em nutrientes para a vegetação. Este processo é contínuo, onde grande parte dos nutrientes do solo extraídos pelas árvores retornam ao ecossistema via serapilheira, pelo processo de ciclagem de nutrientes (BAUER *et al.*, 2016).

A microbiota do solo é constituída por bactérias (maior grupo), fungos, vírus, algas e actinomicetos, desempenhando papel crucial na regulação dos principais processos bioquímicos do solo, como a decomposição da matéria orgânica, a produção de metabólitos (fitohormônios, sideróforos, ácidos orgânicos), a degradação de agroquímicos, a nutrição das plantas por meio da ciclagem de nutrientes (KIPROTICH *et al.*, 2025). Além de promover alterações nas propriedades físicas do solo com a produção de substâncias agregantes e cimentantes, como polissacarídeos e glomalina (BALOTA, 2017). Entre os indicadores biológicos do solo amplamente

utilizados, destacam-se a biomassa microbiana, a atividade enzimática e a respiração microbiana (SOBUCKI *et al.*, 2019).

Os organismos decompositores da matéria orgânica têm um papel fundamental na ciclagem dos nutrientes no solo. E as alterações causadas no ecossistema atingem diretamente na atuação dos microrganismos. A supressão da floresta é um fator principal que afeta a atividade microbiana do solo (ZHOU *et al.*, 2020). Portanto, a moderação da supressão de árvores é importante para estruturar povoamentos e melhorar as condições do solo (MAHAYANI *et al.*, 2022; SOHN *et al.*, 2016), auxiliando no crescimento vegetal e das comunidades microbianas, favorecendo a atividade microbiana do solo (ZHANG *et al.*, 2023)

2.5. Impactos com a Mudança do Uso do Solo em FTS

A mudança na cobertura do solo promove impactos em todos os ambientes, porém, em FTS, a retirada da vegetação nativa adaptada e sua substituição por outros sistemas impacta mais intensamente, sendo de difícil reversão.

No Brasil, as emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente o CO₂, estão diretamente conectadas ao papel vital que a vegetação nativa desempenha como reservatório de carbono (QUINTÃO *et al.*, 2021). Superado apenas pela Rússia, o país ocupa o segundo lugar mundial em extensão de florestas (FAO, 2020). Ficando em primeiro quando se consideram as florestas tropicais (SAATCHI *et al.*, 2011). Contudo, entre 2010 e 2015, o Brasil enfrentou grandes perdas em sua cobertura florestal. Em 2019, as mudanças no uso e cobertura da terra foram a principal fonte de emissões de CO₂, responsáveis por 60% das emissões totais de CO₂ do país (IPCC, 2019).

Este cenário também é visível no semiárido brasileiro, o extrativismo descontrolado de madeira e a retirada da cobertura vegetal para produção agrícola, são observados com frequência. Tornando essas práticas as principais causas de degradação em áreas de maior risco (FERREIRA *et al.*, 2017).

Fernandes *et al.* (2020) observaram aumento de 14% entre 1992 e 2017 nas atividades agrícolas, resultando em maior desmatamento para criação de campos de produção, consequentemente, redução nos estoques de carbono no solo. Como principal cultura de subsistência na Chapada do Araripe (Araripina-PE, NE – Brasil), a

mandioca tem uma ampla produção na região e uso na agricultura familiar. Este cultivo agrícola, associado ao extrativismo de madeira na vegetação nativa para a calcinação de gesso, são as principais causas do desmatamento nessa região do semiárido brasileiro (REZENDE *et al.*, 2022).

O extrativismo florestal na região do Araripe é algo desafiador, uma vez que a mineração de gesso ali existente causa alta demanda de biomassa para as fábricas calcinadoras, consequentemente, as taxas de desmatamento são elevadas. Isso deixa a região suscetível à desertificação, diminuindo a qualidade de seus solos (FONTENELE *et al.*, 2018). A falta da vegetação reduz a captura do carbono atmosférico pelas plantas e a deposição de resíduos orgânicos no solo, o que influi diretamente no estoque de carbono no solo.

De maneira geral, a queima de combustíveis fósseis é a principal fonte de emissões de gases de efeito estufa (GEE). No entanto, mudanças no uso e na cobertura do solo, especialmente a conversão de florestas tropicais em pastagens e campos agrícolas, também desempenham papel significativo nessas emissões (MINASNY *et al.*, 2017).

Simões *et al.* (2021) observaram que a quantidade de carbono armazenado em solos de áreas de Caatinga densa é drasticamente reduzida pela antropização, o que também eleva a densidade em todas as camadas até 1 metro de profundidade, especialmente quando comparado com os campos agrícolas. Em geral, as terras cultivadas armazenam 34% menos carbono no solo do que as áreas densamente florestadas (MENEZES *et al.*, 2021).

A cobertura da vegetação nativa exerce várias funções ecossistêmicas importantes, por exemplo: absorve CO₂, estoca carbono (C) na biomassa vegetal e no solo, preserva a biodiversidade e serviços ecossistêmicos, como regulação climática e abastecimento de água. Já a derrubada da vegetação provoca a exposição do solo e sua matéria orgânica é rapidamente decomposta, liberando CO₂ para a atmosfera. Além disso, essa remoção da vegetação causa aumento na erosão e perda de sedimentos do solo. O uso do fogo para "limpar" áreas recém desmatadas, a fim de estabelecer pastagens ou áreas agrícolas, libera CO₂ e outros gases de efeito estufa. Assim, a substituição da vegetação nativa por novas coberturas ou usos da terra, como cultivos agrícolas, altera o estoque de carbono na biomassa. (QUINTÃO *et al.*, 2021).

Práticas culturais menos nocivas ao solo são essenciais para a manutenção de sua qualidade, um exemplo são os agroecossistemas multifuncionais sustentáveis, que ajudam na melhor ciclagem de nutrientes, aumento dos estoques de carbono e nutrientes no solo e redução de impactos ambientais (FERREIRA NETO *et al.*, 2017; GIONGO *et al.*, 2018). Deve haver um controle e manutenção das ações antrópicas para que elas não atuem de forma prejudicial, especialmente no semiárido para que o Bioma Caatinga não seja degradado e tenha chances de melhorar sua dinâmica em estocar carbono e, conseqüentemente, aumentar sua resiliência diante das mudanças climáticas (VIEIRA *et al.*, 2022).

Referências Bibliográficas

ACOSTA-RANGEL, A. M. et al. The physiological response of ‘Hass’ avocado to salinity as influenced by rootstock. **Scientia horticulturae**, v. 256, p. 108629, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108629>.

AMELUNG, W. et al. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. **Nature communications**, v. 11, n. 1, p. 1–10, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>.

ARAÚJO FILHO, JC de et al. Solos da Caatinga. In: CURI, N.; KER, J.C; NOVAIS, R.F.; VIDAL-TORRADO, P. (Eds). **Pedologia: Solos Dos Biomas Brasileiros**: Viçosa Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2017. p. 227-260.

ARAÚJO, E. C. G. et al. Estoque de carbono na madeira de Eucalyptus - relação material genético x espaçamento entre árvores. **Revista em Agronegócio e Meio e Ambiente**, v. 14, n. 2, p. 505-513, 2021. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n2e7998>.

BALOTA, E. L. Manejo e qualidade biológica do solo. Londrina: Mecenass, 2017

BAUER, D., SANTOS, E. L., & SCHMITT, J. L. Avaliação da decomposição de serapilheira em dois fragmentos de caatinga no sertão paraibano. **Revista de Pesquisas Botânica**, v. 69, p. 307-318, 2016

BEN ALI, A.; SHUKLA, M. Assessment of soil organic and inorganic carbon stocks in arid and semi-arid rangelands of southeastern New Mexico. **Ecological indicators**, v. 166, n. 112398, p. 112398, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112398>.

BINKLEY, D. & FISHER, R. F. Ecology and management of forest soils. 5 ed. New York: John Wiley & Sons, 440 p. 2019.

CASTRO, D. DE B.; MELO, R. DA S.; GARLET, J. Fauna edáfica e serrapilheira associadas á dois fragmentos florestais na Amazônia Meridional. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 12, p. e173111234179, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i12.34179>

COTRUFO, M. F. et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. **Nature geoscience**, v. 12, n. 12, p. 989–994, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>

DE SOUZA MEDEIROS, A. et al. Soil carbon losses in conventional farming systems due to land-use change in the Brazilian semi-arid region. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 287, p. 106690, jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106690>

DERAKHSHAN, F. et al. Comparing Soil and Phytomass Carbon Sequestration in Two Land Uses: Rangeland and Cropland (Case Study: Mahallat, Galcheshmeh Region, Iran). **Journal of Rangeland Science**, v. 12, n. 1, p. 21-33, 2022. DOI: 10.30495/RS.2022.681397

DEXTER, K. G. et al. Inserting tropical dry forests into the discussion on biome transitions in the tropics. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 6, p. 104, 2018. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00104>

FAO. "The state of forest ecosystems". The state of the world's forests - forests, biodiversity and people. Roma, 2020.

FERREIRA, S. P. et al. Análise da suscetibilidade a desertificação na bacia hidrográfica do rio pontal – Pernambuco - Brasil. **Investigaciones Geográficas**, n. 53, p. 37, 25 jul. 2017. DOI:10.5354/0719-5370.2017.43270

FERNANDES, J. D.; MEDEIROS, A. J. D. Desertificação no Nordeste: uma aproximação sobre o fenômeno do Rio Grande do Norte. **Revista Holos**, Rio Grande do Norte, v. 3, n. 25, p. 147-161, jan. 2009. DOI:10.15628/holos.2009.265

FERNANDES, M. M. et al. Assessment of land use and land cover changes and valuation of carbon stocks in the Sergipe semiarid region, Brazil: 1992–2030. **Land Use Policy**, v. 99, p. 104795, dez. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100247>

FERREIRA NETO, R. A. et al. Nitrogen fixation of Poaceae and Leguminosae in a green manure experiment in the Brazilian semiarid region. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 11, p. 1474–1480, 20 nov. 2017. DOI:10.21475/ajcs.17.11.11.pne726

FILIZOLA, H. F. et al. Atributos físicos-hídricos e estoque de carbono de solos de áreas sob irrigação em Itaí, SP. **Revista de Estudos Ambientais**. v. 23, n. 2, p. 6-22, 2021. DOI:10.7867/1983-1501.2021v23n2p6-22

FONTENELE, N. DE M. et al. Volumetric and economic evaluation of Eucalyptus spp. clones in high forest, coppice and native vegetation systems at the Gypsum Pole of

Araripe - PE. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 117, 1 mar. 2018. <https://doi.org/10.18671/scifor.v46n117.07>

GARCIA-FRANCO, N., HOBLEY, E., HÜBNER, R., & WIESMEIER, M. Climate-Smart Soil Management in Semiarid Regions. In **Soil Management and Climate Change**. pp. 349– 368, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812128-3.00023-9>

GLONGO, V. et al. Low Carbon Technologies for Agriculture in Dryland: Brazilian Experience. Climate Resilient **Agriculture-Strategies and Perspectives**, p. 105-128, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.72363>

GUZMAN, J. G.; USSIRI, D. A. N.; LAL, R. Soil physical properties following conversion of a reclaimed minesoil to bioenergy crop production. **Catena**, v. 176, p. 289–295, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.020>

HAN, C. et al. Effects of three coniferous plantation species on plant-soil feedbacks and soil physical and chemical properties in semi-arid mountain ecosystems. **Forest ecosystems**, v. 8, n. 1, 2021. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00281-4>

HECKMAN, K. et al. Beyond bulk: Density fractions explain heterogeneity in global soil carbon abundance and persistence. *Global Change Biology*, v. 28, n. 3, p. 1178-1196, 2022. <https://doi.org/10.1111/gcb.16023>

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). "Summary for policymakers". In: *Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla et al. (eds.)]. In press. 2019

KEENAN, R. J. et al. "Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015". **Forest Ecology and Management**. v. 352, p. 9-20, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.014>

KIPROTICH, K.; MUEMA, E.; WEKESA, C.; NDOMBI, T.; MUOMA, J.; Omayio, D.; OCHIENO, D.; MOTSI, H.; MNCEDI, S.; TARUS, J. Unveiling the roles, mechanisms and prospects of soil microbial communities in sustainable agriculture. **Discover Soil**, v. 2, n. 1, p. 10. 2025.

LAL, R. Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.66, p.1–9, 2020. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1718548>.

LAVALLEE, J. M. et al. Selective preservation of pyrogenic carbon across soil organic matter fractions and its influence on calculations of carbon mean residence times. **Geoderma**, v. 354, n. 113866, p. 113866, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.07.024>.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st

century. **Global change biology**, v. 26, n. 1, p. 261–273, 2020. DOI:10.1111/gcb.14859

LUCAS-BORJA, M. E. et al. Nutrient, metal contents and microbiological properties of litter and soil along a tree age gradient in Mediterranean forest ecosystems. **The Science of the total environment**, v. 650, p. 749–758, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.079

MACEDO, R. S. et al. Effects of degradation on soil attributes under Caatinga in the Brazilian semi-arid. **Revista Árvore**, v. 47, 2023. <https://doi.org/10.1590/1806-9088202300000002>

MAHAYANI, N. P. D. et al. Changes in tree functional composition and forest functioning ten years after logging and thinning interventions in Bornean tropical forests. **Forest ecology and management**, v. 506, n. 119948, p. 119948, 2022. DOI:10.1016/j.foreco.2021.119948

MATALLO JÚNIOR, H. Indicadores de desertificação: histórico e perspectivas. Brasília: UNESCO, 2001

MENEZES, R. S. C., et al. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. **Geoderma**, v. 390, p. 114943, 2021. DOI:10.1016/j.geoderma.2021.114943

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

OLIVEIRA, D. M. DA S. et al. Climate-smart agriculture and soil C sequestration in Brazilian Cerrado: a systematic review. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 47, n. spe, p. e0220055, 2023. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20220055>

OLIVEIRA, E. M; SELVA, V. S. F. Estudo da erosão no Seridó paraibano como indicador do processo de desertificação: Juazeirinho, Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol. 12(3), p. 876-894. 2019. DOI:10.26848/rbgf.v12.3.p876-894

PAGE, K. L.; DANG, Y. P.; DALAL, R. C. The ability of conservation agriculture to conserve soil organic carbon and the subsequent impact on soil physical, chemical, and biological properties and yield. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 31, 2020.

QUINTÃO, José Maurício B. et al. Mudanças do uso e cobertura da terra no Brasil, emissões de GEE e políticas em curso. **Ciência e Cultura**, v. 73, n. 1, p. 18-24, 2021. <http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602021000100004>

REZENDE, S. J. et al. Impact of deforestation on the soil physical and chemical attributes, and humic fraction of organic matter in dry environments in Brazil. **iForest-Biogeosciences and Forestry**, v. 6, pág. 465, 2022. <https://doi.org/10.3832/for4016-015>.

SAATCHI, S. S. et al. "Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents". **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**. vol. 108, n. 24, p. 9899 - 9904, 2011. DOI:10.1073/pnas.1019576108

SANJUÁN, F. A. B. et al. Edaphic mesofauna, some studies done: A review Mesofauna edáfica, algunos estudios realizados: Revisión. **INGECUC**. v. 18, n. 2, p. 197–208, 2022. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.18.2.2022.16>

SANTOS, R. S. et al. Simulating soil C dynamics under intensive agricultural systems and climate change scenarios in the Matopiba region, Brazil. **Journal of environmental management**, v. 347, n. 119149, p. 119149, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119149>

SCHMIDT, D. M.; LIMA, K. C.; JESUS, E. S. Variability Climatic of Water Availability in the Semiarid of the State of Rio Grande do Norte. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 41, n. 3, p. 483–491, 4 dez. 2018. DOI: 10.11137/2018_3_483_491.

SILVA, S. I. A. DA et al. Influência de sistemas de cultivo sobre a comunidade da fauna edáfica no nordeste do Brasil. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 2, p. 829–855, 2022. <https://doi.org/10.5902/1980509855320>

SOBUCKI, L. et al. Manejo e qualidade biológica do solo: uma análise. **Revista Agronomia Brasileira**, v. 3, n. 3, p. 10-13, 2019. DOI:10.29372/rab201904

SOCARRÁS-RIVERO. A. "Diversidad de la mesofauna edáfica en tres usos del suelo en la provincia Mayabeque, Cuba", vol. 41, no. 2, pp. 123–130, 2018.

SOHN, J. A. et al. Heavy and frequent thinning promotes drought adaptation in *Pinus sylvestris* forests. **Ecological applications: a publication of the Ecological Society of America**, v. 26, n. 7, p. 2190–2205, 2016. <https://doi.org/10.1002/eap.1373>

SOUZA, K. K. F.; et al. Utilização de Formigas (Hymenoptera: Formicidae) como bioindicadoras em plantios de Pinus no Paraná. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v.8, n.1, p.110-118, 2018

SOUZA, T. A. F.; FREITAS, H. Arbuscular mycorrhizal fungal community assembly in the Brazilian tropical seasonal dry forest. **Ecological Processes**. [s. l.], v. 6, n. 2, p. 2-10, jan. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13717-017-0072-x>

SUDENE, Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. **Delimitação do semiárido –2021**. Recife (Versão Preliminar). <https://www.gov.br/sudene>. Acesso em: 10 set. 2024

STAN, K.; SANCHEZ-AZOFEIFA, A. Tropical dry forest diversity, climatic response, and resilience in a changing climate. **Forests**, v. 10, n. 5, p. 443, 2019. DOI:10.3390/f10050443

VAN DER PUTTEN, W. H. et al. Plant–soil feedbacks: the past, the present and future challenges. **The Journal of ecology**, v. 101, n. 2, p. 265–276, 2013. DOI:10.1111/1365-2745.12054

VARGAS, G. R. et al. Ciclagem de biomassa e nutrientes em plantios florestais. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v. 11, n. 2, p. 111- 123, 2018. DOI: 10.5935/PAeT.V11.N2.12

VIEIRA, L. C. DE S. et al. Sazonalidade do Sequestro e Estoque de Carbono na Caatinga, Durante as Estações Seca e Chuvosa. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, p. 539–564, 28 out. 2022. DOI:10.55761/abclima.v31i18.15583

VITOUSEK, Peter M.; SANFORD, R. L. Nutrient cycling in moist tropical forest. **Annual review of Ecology and Systematics**, p. 137-167, 1986. DOI:10.1146/annurev.es.17.110186.001033

WANG, Y.; SHAO, M.; SHAO, H. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China. **Journal of hydrology**, v. 381, n. 1–2, p. 9–17, 2010. DOI:10.1016/j.jhydrol.2009.09.042

WIESMEIER, Martin et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. **Geoderma**, v. 333, p. 149-162, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>

YU, W. et al. Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils? **Soil biology & biochemistry**, v. 172, n. 108756, p. 108756, 2022. DOI:10.1016/j.soilbio.2022.108756

ZHANG, G. S.; ZHANG, F. X.; LI, X. T. Effects of polyester microfibers on soil physical properties: Perception from a field and a pot experiment. **The Science of the total environment**, v. 670, p. 1–7, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.149

ZHANG, X. et al. Plantations thinning: A meta-analysis of consequences for soil properties and microbial functions. **The Science of the total environment**, v. 877, n. 162894, p. 162894, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162894>

ZHAO, X. M. et al. Particle component and distribution characteristics of organic carbon of sediments in water and shore soils. **J. Soil Water Conserv**, v. 28, p. 304-308, 2014.

ZHOU, T.; WANG, C.; ZHOU, Z. Impacts of forest thinning on soil microbial community structure and extracellular enzyme activities: A global meta-analysis. **Soil biology & biochemistry**, v. 149, n. 107915, p. 107915, 2020. DOI:10.1016/j.soilbio.2020.107915

3. MUDANÇAS NO USO DA TERRA MODIFICAM ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO EM UMA FLORESTA TROPICAL SECA BRASILEIRA

Resumo

As florestas tropicais secas brasileiras estão entre os ecossistemas mais suscetíveis à degradação antrópica, sobretudo pela agricultura intensiva, silvicultura e extrativismo, que afetam a qualidade do solo e a resiliência ambiental. A Chapada do Araripe, no semiárido de Pernambuco, representa um caso emblemático desse processo. Este estudo teve como objetivo avaliar comparativamente os efeitos de diferentes usos da terra sobre atributos físicos, químicos e biológicos do solo, integrando múltiplos indicadores para identificar padrões de degradação e potenciais de recuperação. Foram analisadas quatro áreas: vegetação nativa preservada (VNP), cultivo de eucalipto (EUC), cultivo de mandioca (MAN) e área em revegetação (REV). Amostras de solo foram coletadas em quatro profundidades (0–60 cm) durante os períodos seco e chuvoso, com análises de densidade, porosidade, pH, cátions trocáveis, fósforo disponível, carbono orgânico e indicadores biológicos, incluindo carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal (RB), quocientes microbianos ($q\text{-mic}$), metabólico ($q\text{-CO}_2$), de mineralização ($q\text{-min}$) e atividade da β -glicosidase (BGC). Os resultados mostraram que a VNP apresentou melhores condições físicas, com menor densidade do solo ($1,25 \text{ g cm}^{-3}$) e maior macroporosidade ($0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). A REV destacou-se pelo maior pH (6,1) e magnésio ($1,33 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), enquanto o EUC concentrou os maiores teores de fósforo ($5,05 \text{ mg kg}^{-1}$). O MAN exibiu maior degradação biológica, refletida em menor atividade enzimática e $q\text{-min}$ até 40% superior no período seco. O CBM atingiu 280 mg C kg^{-1} na VNP no período chuvoso, quase o dobro do observado no MAN. Conclui-se que a conversão da vegetação nativa para cultivos agrícolas compromete severamente a qualidade do solo, enquanto áreas preservadas ou em restauração apresentam maior capacidade de manutenção da funcionalidade edáfica. Esses resultados reforçam a conservação e a revegetação como estratégias essenciais para a sustentabilidade das florestas tropicais secas.

Palavra-chave: Qualidade do solo. Matéria orgânica do solo. Uso e cobertura da terra. Semiárido brasileiro.

3. LAND USE CHANGES MODIFY THE PHYSICAL, CHEMICAL, AND BIOLOGICAL ATTRIBUTES OF SOIL IN A BRAZILIAN DRY TROPICAL FOREST

Abstract

Tropical dry forests in Brazil are among the most vulnerable ecosystems to anthropogenic degradation, primarily due to intensive agriculture, forestry, and extractivism, which compromise soil quality and ecosystem resilience. The Araripe Plateau, in the semiarid region of Pernambuco, represents an emblematic case of this process. This study aimed to evaluate and compare the effects of different land uses on the physical, chemical, and biological attributes of soil, integrating multiple indicators to identify patterns of degradation and potential for recovery. Four representative areas were analyzed: preserved native vegetation (PNV), eucalyptus plantation (EUC), conventional cassava cultivation (CAS), and a revegetated site (REV). Soil samples were collected at four depths (0–60 cm) during both dry and rainy seasons. Analyses included bulk density, porosity, pH, exchangeable cations, available phosphorus, organic carbon, and biological indicators such as microbial biomass carbon (MBC), basal respiration (BR), microbial quotient (q-mic), metabolic quotient (q-CO₂), mineralization quotient (q-min), and β-glucosidase (BGC) activity. Results showed that PNV maintained the best physical conditions, with lower bulk density (1.25 g cm⁻³) and higher macroporosity (0.18 m³ m⁻³). REV exhibited the highest pH (6.1) and magnesium content (1.33 cmol_c kg⁻¹), while EUC had the highest phosphorus levels (5.05 mg kg⁻¹). CAS revealed more severe biological degradation, with reduced enzymatic activity and q-min values up to 40% higher during the dry season. MBC reached 280 mg C kg⁻¹ in PNV during the rainy season, nearly double the values recorded in CAS. Overall, the conversion of native vegetation to agricultural systems severely compromises soil quality, whereas preserved or revegetated areas demonstrate greater potential to maintain soil functionality. These findings highlight the importance of conservation and revegetation as key strategies for sustaining tropical dry forest ecosystems.

Keywords: Soil quality. Soil organic matter. Land use and land cover. Brazilian semiarid.

3.1. Introdução

Nas regiões áridas e semiáridas, grande parte da população depende da agricultura para sua subsistência. Nesse contexto, muitas vezes, as mudanças na paisagem ambiental, o uso inadequado do solo e o extrativismo florestal descontrolado têm se intensificado (REZENDE *et al.*, 2022). Na maioria das vezes como resultado da falta de alternativas sustentáveis e de políticas públicas eficazes.

Além da agricultura, a extração de madeira representa uma problemática evidente em Araripina-PE. Localizada na região do Araripe, responsável por 79,7% da produção de gesso no Brasil (DNPM, 2018), a área se destaca pela intensa atividade de mineração. No entanto, essa atividade exige grande quantidade de biomassa para abastecer as fábricas calcinadoras, o que tem contribuído significativamente para o desmatamento. Como consequência, a região torna-se mais suscetível à desertificação e à perda da qualidade dos solos (FONTENELE *et al.*, 2018).

Santos e El-Deir (2019) afirmam que existe uma grande devastação do bioma Caatinga aliado a extração da madeira nativa local para uso como fonte de energia nos fornos de empresas calcinadoras que formam o Pólo do Araripe. Essa redução nos ambientes florestais potencializa os efeitos de degradação, levando a uma possível desertificação.

A degradação e as mudanças na densidade da vegetação têm um impacto importante na modificação da matéria orgânica que se incorpora ao solo (YANG *et al.*, 2023). Diante desse cenário, impactos nos atributos físicos e químicos do solo são inevitáveis. Exemplificando, a redução da cobertura vegetal de áreas florestais gera um aumento no processo de erosão do solo, consequentemente maior lixiviação e perda de nutrientes do solo, interrompendo os seus ciclos (ARIAS-ORTIZ *et al.*, 2021).

Singh *et al.* (2020) observaram a direta relação entre a densidade do solo e o teor de matéria orgânica, atributos negativamente correlacionados, ou seja, quando a matéria orgânica em áreas degradadas pela remoção da vegetação é menor, a densidade do solo tende a aumentar ao longo do tempo. O inverso também ocorre, um solo com teor elevado de matéria orgânica, geralmente, possui menores valores de densidade.

Além disso, estudos comprovam que o maior teor de matéria orgânica gera bons efeitos na estabilidade de agregados do solo (ADUHENE-CHINBUAH *et al.*, 2022; YU *et al.*, 2022). Resumindo, a remoção da vegetação acelera a degradação do

solo, acarreta a perda de nutrientes, consequentemente, na decomposição acelerada da matéria orgânica e quebra de agregados do solo (PLUER *et al.*, 2020).

Atrelado ao processo de mudanças no uso do solo, outro fator importante para sua qualidade são as características próprias da região semiárida. Uma vez que os solos da região já possuem condições limitantes naturalmente. Assim como as condições climáticas do semiárido que geralmente são favoráveis a processos de erosão. Com isso, tornam-se necessários estudos relacionados a mudança dos atributos do solo, sob diferentes usos no semiárido brasileiro, para futuras ações de conservação.

Levando em consideração o exposto, esse estudo tem como hipótese que o solo sofre aumento ou diminuição das suas propriedades físico-químicas e biológicas, em função dos diferentes sistemas de uso. Para isso, objetivou-se estimar e comparar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo sob diferentes usos, em floresta tropical seca (FTS).

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Caracterização e Histórico de Uso das Áreas

O estudo foi realizado em áreas localizadas dentro da Unidade de Conservação da Chapada do Araripe, protegida como uma Área de Proteção Ambiental (APA) de uso sustentável, no município de Araripina, extremo oeste do estado de Pernambuco (Figura 1). Segundo o ICMBIO (2019), a área total do território Chapada do Araripe é 972.605,18 hectares, situada entre as coordenadas geográficas 7°34'34" Sul de latitude e 40°29'54" Oeste de longitude, nos Estados do Pernambuco, Ceará e Piauí.

A vegetação é basicamente composta pela fitofisionomia "Carrasco", vegetação caducifólia seca encontrada na Caatinga, com indivíduos de pequeno porte de altura (± 4 m), com presença de muitas lianas, terreno plano e solo arenoso (SANTOS *et al.*, 2020).

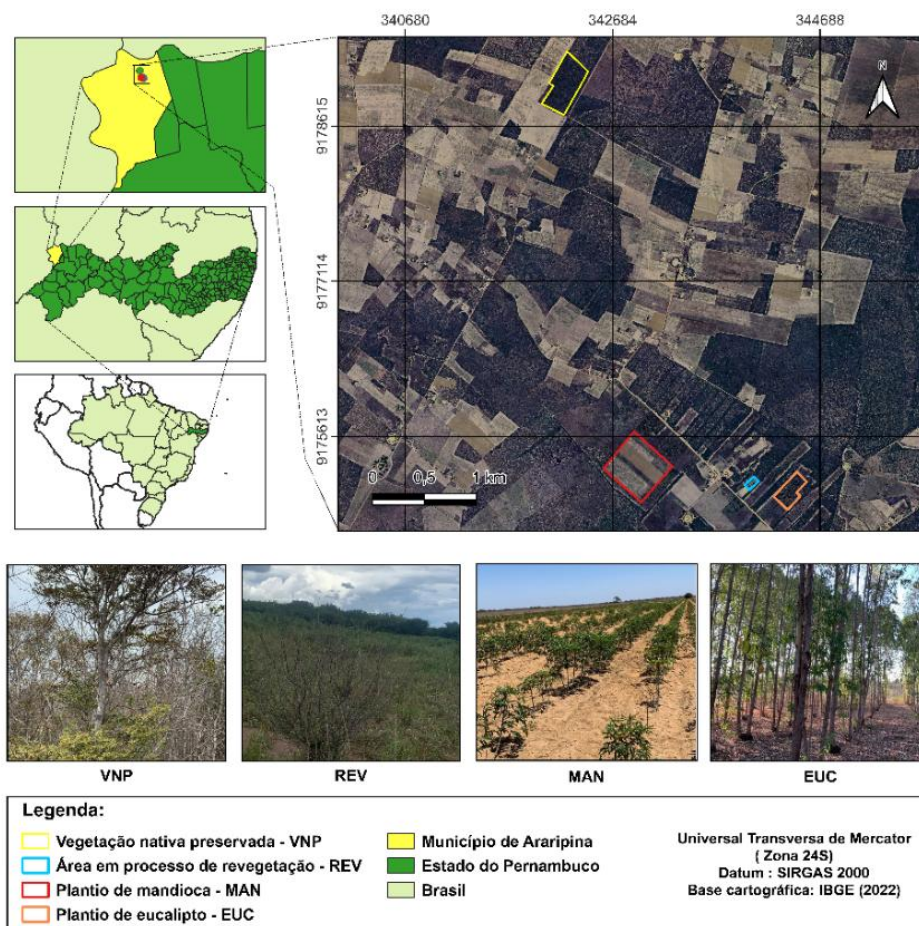


Figura 1 – Mapa de localização do Estado de Pernambuco, do município de Araripina e das quatro áreas estudadas, com detalhes da paisagem.

Fonte: Autor (2025).

Como fonte de estudos, foram utilizadas quatro áreas, todas localizadas na mesma posição de relevo (plano) e nas proximidades da Estação Experimental do IPA (Instituto Agrônomo de Pernambuco), sob condições específicas de uso do solo (Tabela 1). Em todas as áreas de estudo, o solo foi classificado como LATOSSOLO AMARELO Distrófico (SANTOS *et al.*, 2025), correspondente ao Oxisol (Soil Survey Staff, 2014), com textura franco arenosa.

Segundo a classificação de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013), a região tem clima semiárido quente, tipo estepe com chuvas de verão-outono. A temperatura média anual é de 24 °C e a precipitação média anual é de 759 mm (APAC, 2024). Possui topografia plana, com altitude variando de 828 a 837 m acima do nível do mar (REZENDE *et al.*, 2022).

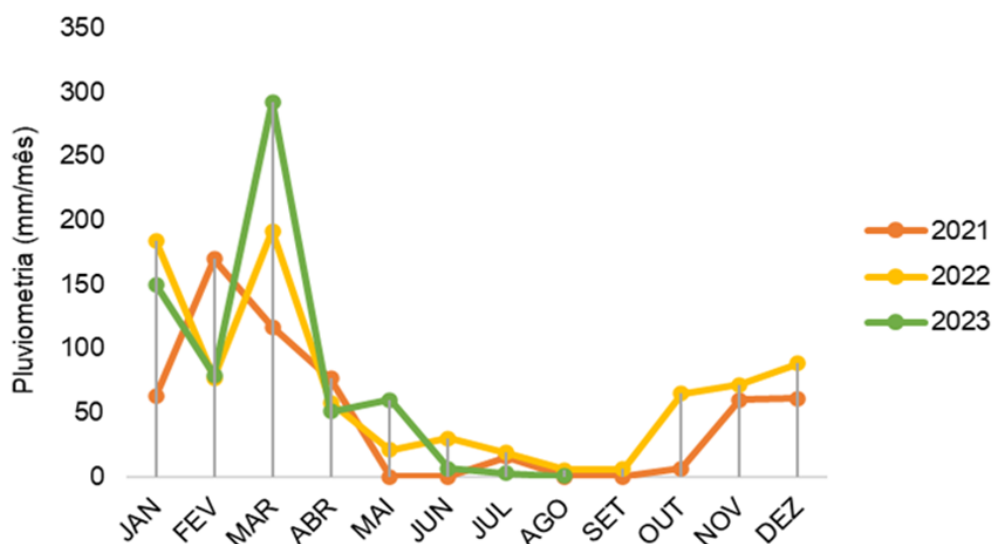


Figura 2 – Pluviosidade mensal (mm) durante o período de coleta de dados, em Araripina – PE, mais precisamente nas áreas de estudo (dentro da área experimental do IPA – Instituto Agrônômico de Pernambuco).

Fonte: Autor (2025)

As coletas de dados em campo foram realizadas em períodos climáticos distintos (seco e chuvoso). A Figura 2 apresenta a pluviosidade entre os anos de 2021 e 2023, sendo as coletas realizadas em setembro de 2022 e abril de 2023, levando em consideração o final do período seco e chuvoso, respectivamente. Dados adquiridos na estação pluviométrica do IPA.

Tabela 1 – Descrição e histórico das áreas estudadas

Áreas	Descrição
Vegetação Nativa Preservada (VNP)	Área de, aproximadamente, 20 ha localizada nas coordenadas 7° 25' 36" S e 40° 25' 50" W, a 837 metros de altitude. Tem vegetação sem interferência antrópica, composta, principalmente, por Caatinga Hipoxerófila com trechos de Floresta Caducifólia. As espécies mais frequentes são: Conduru-branco (<i>Oxandra reticulata</i>), Calumbi (<i>Mimosa arenosa</i>), Bananinha (<i>Annona leptopetala</i>), Camunzé (<i>Pithecolobium polycephalum</i>), Espinheiro (<i>Sideroxylon obtusifolium</i>), Pinha brava (<i>Annona leptopetala</i>), Canafístula (<i>Senna spectabilis</i>), Pereiro preto (<i>Aspidosperma pyrifolium</i>) e Pau branco (<i>Auxemma oncocalyx</i>) (CAVALCANTE et al., 2021).

<i>Eucalipto</i> (EUC)	Área de cerca de 1 ha, com coordenadas 7° 27' 40" S e 40° 24' 39" W, a 828 metros de elevação, foi desmatada e cultivada com mandioca, mamona e feijão por mais de 40 anos. Em 2005, passou a monocultivo de Eucaliptos, com plantio de quinze clones de diversas espécies e híbridos (<i>Eucalyptus urophylla</i>; <i>Eucalyptus tereticornis</i>; Híbrido de <i>E. urophylla</i> x <i>E. tereticornis</i> x <i>E. pellita</i>; Híbrido de <i>E. urophylla</i> x <i>E. tereticornis</i>; e <i>Eucalyptus brassiana</i>). O preparo do solo incluiu aração, gradagem e plantio em covas, com correção e adubação NPK (6-24-12). Os tratos culturais são capina, coroamento e roço mecânico, e a serapilheira é deixada como cobertura.
<i>Mandioca</i> (MAN)	Área de aproximadamente 1 ha, com coordenadas 7° 27' 40" S e 40° 25' 21" W, a 828 metros de altitude, foi desmatada e queimada em 1995 para cultivo de mandioca. O solo foi preparado com aração e gradagem, sem correção de acidez. A adubação com NPK foi feita até 2009. Os tratos culturais incluem capina de 4 a 5 vezes por ano, corte manual a cada 18 meses, e uso ocasional de defensivos agrícolas. Após o corte, as folhas são deixadas no solo e incorporadas antes do novo plantio de mandioca.
<i>Revegetação</i> (REV)	Área sob coordenadas 7° 27' 33,0" S e 40° 24' 58,9" W, anteriormente foi cultivada com mandioca e feijão, abandonada por cinco anos, e em 2022 foi iniciado um projeto de revegetação. Foram plantadas mudas de cinco espécies nativas da Caatinga: quatro pioneiras (<i>Erythrina velutina</i>, <i>Amburana cearensis</i>, <i>Cenostigma pyramidale</i>, <i>Schinopsis brasiliensis</i>) e uma secundária (<i>Astronium urundeuva</i>). As mudas, adquiridas no viveiro de Xingó (CHESF) tinham cerca de 40 cm de altura e foram transplantadas para covas de 40 cm de diâmetro. No primeiro mês após o transplante, foi feita irrigação manual, semanalmente. O espaçamento de plantio foi de 3 x 3 m, em parcelas de 12 x 15 m, com cinco linhas de plantio, sendo uma para cada espécie. Como adubo e condicionantes do solo foram utilizados: esterco de caprino e composto orgânico, fungos micorrízicos e hidrogel.

3.2.2. Amostragem do solo

As amostras de solo foram coletadas com auxílio de trado nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade, com estrutura deformada para análises químicas, e preservadas em cilindro volumétrico para análises físicas do solo. As amostras foram coletadas respeitando a projeção da copa das plantas quando em

ambientes florestais, e em cada área foram instaladas 8 (oito) parcelas para coleta de solo, em delineamento inteiramente casualizado. Para os atributos químicos, em cada parcela por área, foram coletadas 5 (cinco) amostras simples, formando 1 (uma) amostra composta. Enquanto para os atributos físicos que exigem amostra com estrutura preservada, foi coletada uma amostra no centro de cada parcela.

3.2.3. Atributos físicos

As análises físicas do solo foram avaliadas apenas no período seco (setembro/2022), enquanto as químicas foram realizadas nas amostras obtidas nos dois momentos: o primeiro no final do período seco (setembro/2022) e o segundo no final do período chuvoso (abril/2023).

Para fins de caracterização física do solo (Tabela 2), as amostras com estrutura deformada foram utilizadas para determinação da granulometria e argila dispersa em água (ADA), pelo método da pipeta; densidade das partículas (D_p), pelo método do balão volumétrico. A partir dos dados de ADA e de argila total, obtidos pela granulometria, foi calculado o grau de floculação (GF) (TEIXEIRA et al., 2017).

Com as amostras preservadas em anéis volumétricos, foram realizadas as análises de densidade do solo (D_s), porosidade total (P_t), macroporosidade (M_a) e microporosidade (M_i), sendo a M_i pelo conteúdo de água armazenada na tensão de 6 kPa e a M_a obtida pela diferença entre a P_t e M_i (TEIXEIRA et al., 2017).

Tabela 2 – Caracterização granulométrica de um latossolo amarelo em diferentes profundidades e usos do solo em Araripina-PE.

Tratamento	Areia	Silte	Argila	ADA ¹	GF ²
		g kg^{-1}			%
		0-10 cm			
VNP ³	792,2	44,7	163,1	59,0	63,9
EUC ⁴	736,1	32,8	231,1	114,2	50,4
MAN ⁵	769,2	29,2	201,6	112,3	44,2
REV ⁶	747,8	21,9	230,3	104,6	54,1
		10-20 cm			
VNP	802,3	37,0	160,8	68,9	56,9
EUC	740,4	31,5	228,1	127,1	44,1
MAN	780,0	28,1	191,9	121,1	34,8
REV	75,66	13,8	229,6	129,2	43,8

		20-40 cm			
VNP	798,3	40,6	161,1	83,3	48,4
EUC	730,1	23,9	246,0	141,4	42,6
MAN	768,4	30,3	201,3	130,7	34,1
REV	728,7	39,5	231,8	132,1	41,7
		40-60 cm			
VNP	781,7	40,3	178,1	94,1	47,2
EUC	729,5	41,1	229,4	121,7	47,9
MAN	729,8	35,2	235,0	125,3	46,9
REV	720,8	40,0	239,2	119,8	49,3

¹Argila dispersa em água, ²Grau de floculação, ³Vegetação nativa preservada, ⁴Eucalipto, ⁵Mandioca, ⁶Revegetação.

3.2.4. Atributos químicos

As análises químicas foram feitas nas amostras de solo deformadas, sendo determinados: pH em H₂O (1:2,5); cátions trocáveis (Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ e K⁺); acidez potencial (H+Al) e P disponível. Os cátions trocáveis Al³⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ foram extraídos com KCl 1,0 mol L⁻¹, sendo Ca²⁺ e Mg²⁺ determinados por espectrofotometria de absorção atômica e Al³⁺ dosado por titulometria. Enquanto P disponível, e Na⁺ e K⁺ trocáveis foram extraídos com Mehlich-1, sendo P determinado por colorimetria e Na⁺ e K⁺ por fotometria de chama.

A acidez potencial (H+Al) foi extraída com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ e determinada por titulometria. Todas as análises foram realizadas conforme procedimentos recomendados por Teixeira et al. (2017). A matéria orgânica do solo foi estimada a partir dos teores de carbono orgânico total (COT), que por sua vez foi determinado pelo método da combustão úmida (YEOMANS; BREMNER, 1988).

3.2.5. Atributos biológicos

As propriedades biológicas determinadas foram carbono da biomassa microbiana (CBM) Yeomans; Bremner (1988) e Islam; Weil (1998), a respiração basal (RB) conforme Stotzky (1965), e atividade da beta-glicosidase (BGC) segundo Tabatabai (1994). O quociente metabólico (q-CO₂), microbiano (q-mic) e de mineralização (q-min), foram calculados conforme Silva et al. (2022).

3.2.6. Análise dos Dados

Inicialmente, os dados foram testados para normalidade e homogeneidade, como pressupostos necessários para análise de variância (ANOVA). Para isso, foram utilizados os testes de Shapiro; Wilk (1965) e Bartlett Test, respectivamente. Quando significativos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Realizou-se a análise estatística multivariada, com a técnica de análise de componentes principais (ACP), pela extração dos dois primeiros componentes. Para as análises, foram utilizados os softwares Sisvar e Minitab.

3.3. Resultados e Discussão

3.3.1. Atributos Físicos do Solo

Em relação à caracterização granulométrica (Tabela 2), no geral, observou-se maior proporção de areia nos solos sob todos os usos. Essa condição beneficia a aeração do solo, contudo, diminui a função de armazenamento de água. Isso se torna um fator limitante em áreas de semiárido, uma vez que o regime hídrico já é irregular e com pouca ou nenhuma precipitação em determinados períodos.

Os atributos físicos densidade do solo (Ds), grau de flocculação (GF), macro e microporosidade do solo diferiram entre os usos e as camadas avaliadas. Já a porosidade total só diferiu em função da profundidade (Figura 4). O solo da área de VNP teve o menor resultado de densidade do solo (Figura 3 a) e maior grau de flocculação, quando comparado com a área de MAN (Figura 3 c). Já os valores de macro e microporos na VNP foram próximos (Figura 3 e, f), mostrando um equilíbrio.

Características já esperadas para este tipo de vegetação, uma vez que, geralmente, são ambientes sob maior aporte de matéria orgânica (apresentada posteriormente) e com pouca interferência antrópica. A ação antrópica e a mudança da VNP para áreas de cultivo geram aumento na densidade do solo e diminuição no grau de flocculação, afirmação comprovada em estudos que avaliaram a mudança das propriedades físicas em diferentes usos de solo. YIMAM et al. (2024) observaram valores maiores de Ds em áreas de cultivo, quando comparados a plantio de eucalipto e pastagem.

Quanto aos resultados de macro e microporos. Essa condição é favorável pois possibilita a retenção de água para a planta (microporos) e, por outro lado, os macroporos auxiliam na drenagem do excesso de água no solo. Geralmente, solos florestais que sofrem pouca perturbação possuem um maior fluxo de água com auxílio das raízes das plantas, maior acúmulo de húmus na superfície do solo, reduzindo a velocidade e capacidade de erosão, além do escoamento superficial (JIANG et al., 1996; FENTIE et al., 2020).

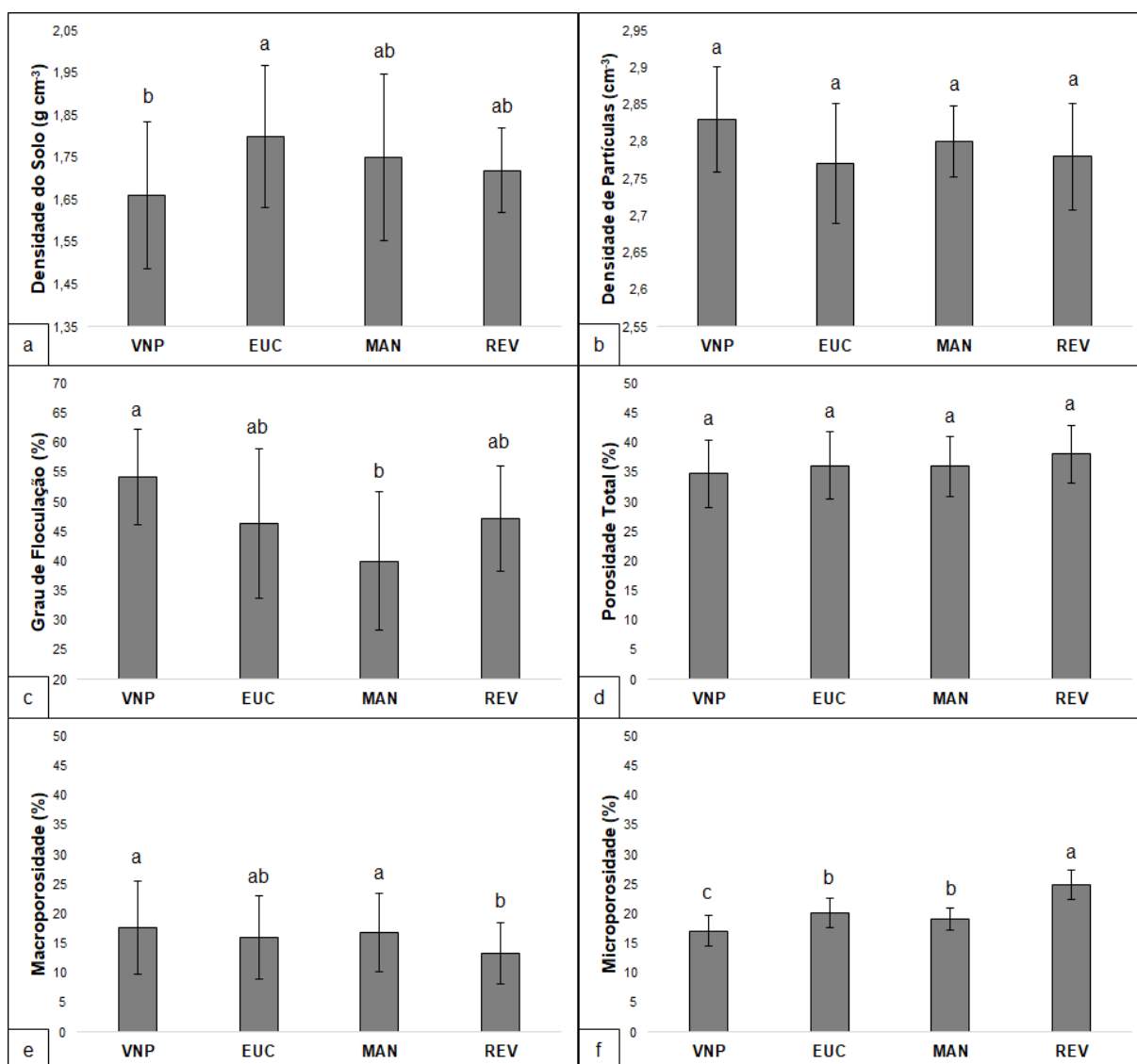


Figura 3 – Densidade do solo (a), das partículas (b), grau de floculação (c), porosidade total (d), macroporosidade (e) e microporosidade (f) em função dos diferentes sistemas de uso do solo, em Araripina (PE).

Em que: Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade entre as áreas avaliadas

Ao avaliar os atributos físicos em profundidade, observaram-se alguns comportamentos já esperados, como uma alta Ds nas camadas de 20-40 e 40-60 cm (Figura 4a), alto grau de flocculação na camada de 0-10 cm (Figura 4c), assim como alta porosidade total (Figura 4d) e macroporosidade (Figura 4e) nesta camada. Nota-se relação entre os atributos físicos de estrutura e permeabilidade do solo, com maiores Ds e GF estando associados com as camadas onde ocorrem maior PT e Ma, fatores relacionados com os componentes da matriz do solo em relação a dinâmica da água e de fatores de agregação (JENSEN *et al.*, 2019; LAL, 2020).

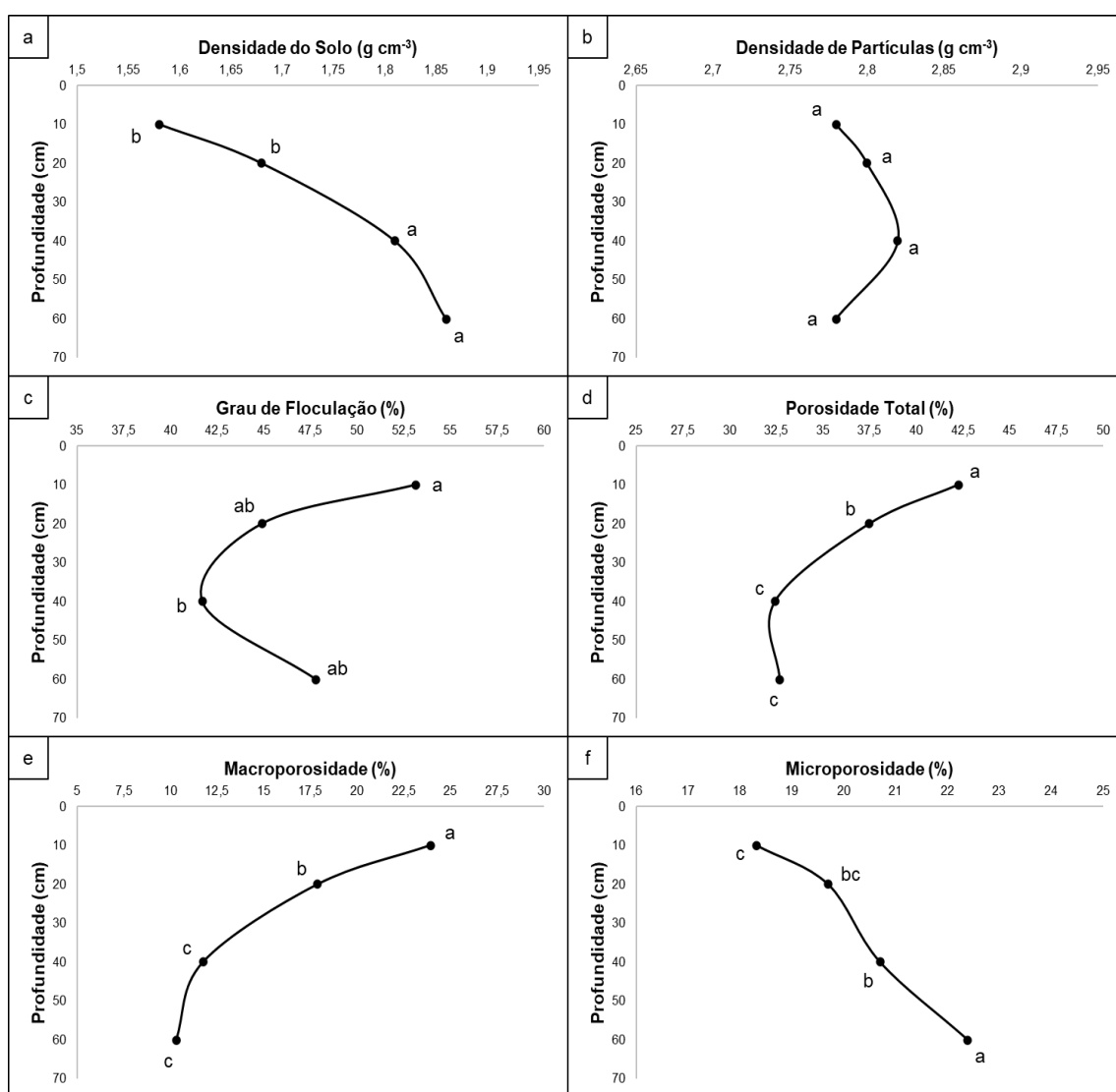


Figura 4 – Densidade do solo (a), densidade das partículas (b), grau de flocculação (c), porosidade total (d), macroporosidade (e) e microporosidade (f) no solo, em função da profundidade, em Araripina (PE).

Em que: Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade entre as camadas avaliadas

Tais resultados também estão diretamente relacionados ao maior aporte de matéria orgânica nas camadas superiores. Geralmente, a densidade do solo tende a aumentar com a profundidade. Isso ocorre porque as camadas mais profundas são mais adensadas ou compactadas, possuem menor teor de matéria orgânica, menor agregação, menor penetração de raízes e atividade biológica, com espaços porosos mais restritos em comparação com as camadas superficiais (FENTIE et al., 2020).

Inversamente, a microporosidade aumenta nas camadas mais profundas, seguindo o foi observado para o teor de argila (Figura 4e). Como a menor fração granulométrica do solo, a argila possibilita a formação de microporos, de grande importância para a retenção de água no solo. E isso é de fundamental importância, especialmente no semiárido, onde a distribuição da precipitação é muito irregular no tempo e no espaço.

No entanto, para que o solo funcione como um reservatório de água para as plantas, é preciso que suas partículas estejam formando agregados estáveis, com equilíbrio entre macro e microporos, características associadas à sua estrutura (LAL, 2020). E os atributos físicos que refletem isso mudaram em função do uso e em profundidade, estando também relacionados ao equilíbrio químico, aspecto a ser tratado na sequência.

3.3.2. Atributos Químicos do Solo

Como observado na tabela 3, os valores de magnésio (Mg^{2+}) e saturação por bases (V) foram maiores no período seco nas camadas 0-10, 10-20 e 20-40 cm. O mesmo ocorreu para os valores de pH, soma de bases e CTC potencial (T) na camada de 20-40 cm. Os resultados da acidez potencial (H+Al) e da saturação por alumínio (m) foram maiores no período chuvoso.

Tabela 3 – Propriedades químicas do solo em função da época de coleta (seca e chuvosa) nas camadas avaliadas, em Araripina (PE)

Prof.	Época	¹ pH _{H2O}	² Ca ²⁺	³ Mg ²⁺	⁴ K ⁺	⁵ SB	⁶ Al ³⁺	⁷ H+Al	⁸ t	⁹ T	¹⁰ V	¹¹ m	¹² P
cm			cmol _c kg ⁻¹								%		mg kg ⁻¹
0-10	Seca	5,13 a	2,67 a	0,92 a	0,08 a	3,69 a	0,34 a	3,11 a	4,02 a	6,79 a	51,16 a	12,15 a	4,35 a
	Chuvosa	5,22 a	2,37 a	0,58 b	0,06 a	2,99 a	0,36 a	3,30 a	3,36 b	6,30 a	45,42 b	15,60 a	4,96 a
10-20	Seca	4,88 a	1,47 a	0,51 a	0,05 a	2,03 a	0,46 a	3,08 b	2,49 a	5,11 a	37,72 a	23,88 a	3,08 a
	Chuvosa	4,92 a	1,45 a	0,35 b	0,04 a	1,78 a	0,48 a	3,37 a	2,26 a	5,15 a	32,67 b	28,84 a	3,01 a
20-40	Seca	4,82 a	0,90 a	0,30 a	0,03 a	1,24 a	0,50 a	2,79 a	1,74 a	4,02 a	29,81 a	32,72 b	1,43 a
	Chuvosa	4,66 b	0,74 a	0,15 b	0,03 a	0,85 b	0,55 a	2,86 a	1,40 b	3,71 b	22,20 b	44,33 a	1,54 a
40-60	Seca	4,66 a	0,61 a	0,16 a	0,02 a	0,79 a	0,58 a	2,48 b	1,37 a	3,27 b	24,01 a	43,15 a	0,67 b
	Chuvosa	4,59 a	0,67 a	0,12 a	0,02 a	0,75 a	0,61 a	2,77 a	1,36 a	3,52 a	20,85 a	48,54 a	1,08 a

¹Potencial hidrogeniônico (1:2,5), ²cálcio trocável, ³magnésio trocável, ⁴potássio trocável, ⁵soma de bases, ⁶alumínio trocável, ⁷acidez potencial, ⁸capacidade de troca de cátions efetiva, ⁹capacidade de troca de cátions potencial, ¹⁰saturação por bases, ¹¹saturação por alumínio e ¹²fósforo disponível. Médias seguidas por letras iguais indicam que não há diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade entre a coleta da época seca e chuvosa, dentro de cada camada de solo.

O volume de precipitação pluvial influi sobre a acidez do solo e a saturação por bases ao promover a lixiviação de cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+) para fora do solo, que resulta em um aumento relativo dos cátions ácidos (H^+ e Al^{3+}), consequentemente, diminuindo a V. Chuvas fortes e duradouras podem provocar a perda de cátions básicos por lixiviação, principalmente em solos arenosos ou com baixa capacidade de retenção de nutrientes, resultando em uma redução temporária na saturação por bases (OLIVEIRA, 2024). Além disso, a erosão do solo pode agravar essa situação ao remover partículas do solo levando consigo cátions básicos aderidos a essas partículas, intensificando a acidez do solo (McFARLAND et al., 2024).

Ao comparar os atributos químicos entre as áreas sob os diferentes usos do solo, no geral, foi observada uma baixa fertilidade. O pH foi maior na área em processo de revegetação (REV) em todas as camadas, o mesmo comportamento ocorreu para os teores de Mg^{2+} e soma de bases (Tabela 4). O uso de fontes de adubação orgânica e condicionadores de solo durante a implementação do experimento de revegetação, pode ter influenciado, no aumento de bases, mudando o pH e, consequentemente, diminuindo sua acidez.

Já os teores de Ca^{2+} e K^+ e capacidade de troca de cátions (CTC) foram maiores nas áreas sob REV e sob cultivo de EUC. Os maiores teores de bases trocáveis no solo das áreas de EUC e REV, podem estar relacionados ao uso de fertilizantes e calcário (REZENDE et al., 2022). Em contrapartida, o solo na área de VNP apresentou valores baixos de bases trocáveis (Tabela 4). No geral, as bases trocáveis em áreas sob vegetação nativa preservada são baixas naturalmente (MARTINS et al., 2019), pois estas áreas não recebem aportes de produtos químicos, apenas material orgânico da deposição de serapilheira.

A saturação por alumínio (m) aumentou na área sob VNP em profundidade (Tabela 4). Rezende *et al.* (2022) observaram resultados semelhantes ao analisar diferentes usos de solo na mesma região, corroborando com esses resultados.

Observou-se maior teor de P na área de EUC (Tabela 4). Isso pode estar associado ao uso de fertilizantes fosfatados adicionados durante a implantação do plantio e ao grande aporte de resíduo orgânico dessa vegetação. A deposição de restos vegetais e formação de serapilheira contribui para a disponibilidade de nutrientes, dentre eles, o P. A serapilheira aportada ao solo e sua decomposição propicia a liberação de P e sua absorção pelas plantas, minimizando sua adsorção e precipitação, comuns em ambientes tropicais (ÁVILA *et al.*, 2016).

Tabela 4 – Propriedades químicas do solo em função dos diferentes sistemas de uso nas camadas avaliadas, em Araripina (PE)

Prof.	Uso	¹ pH	² Ca ²⁺	³ Mg ²⁺	⁴ K ⁺	⁵ SB	⁶ Al ³⁺	⁷ H+Al	⁸ t	⁹ T	¹⁰ V	¹¹ m	¹² P
cm		1:2,5	cmol _c kg ⁻¹							%		mg kg ⁻¹	
0-10	VNP	4,80 c	1,58 b	0,41 c	0,07 a	2,07 b	0,52 a	4,16 a	2,58 b	6,23 bc	31,64 c	23,49 a	3,55 b
	EUC	5,27 b	4,07 a	0,91 b	0,07 a	5,03 a	0,28 b	3,72 b	5,31 a	8,75 a	54,63 b	7,21 b	5,05 a
	MAN	4,53 c	1,41 b	0,35 c	0,06 a	1,82 b	0,50 a	3,11 c	2,32 b	4,93 c	36,62 c	22,73 a	4,21 ab
	REV	6,09 a	3,03 a	1,33 a	0,08 a	4,44 a	0,09 c	1,83 d	4,53 a	6,27 b	70,28 a	2,08 b	3,80 ab
10-20	VNP	4,52 c	0,61 b	0,15 c	0,05 a	0,80 b	0,66 a	3,88 a	1,46 b	4,68 b	16,85 c	46,52 a	2,61 a
	EUC	4,97 b	1,85 a	0,51 b	0,05 a	2,40 a	0,45 b	3,62 ab	2,85 a	6,02 a	37,26 b	20,93 c	3,40 a
	MAN	4,42 c	1,13 b	0,24 c	0,04 a	1,41 b	0,60 a	3,29 b	2,01 b	4,70 b	29,43 b	31,36 b	3,35 a
	REV	5,69 a	2,25 a	0,83 a	0,03 a	3,01 a	0,17 c	2,11 c	3,17 a	5,11 b	57,25 a	6,62 d	2,82 a
20-40	VNP	4,47 c	0,48 c	0,10 c	0,03 ab	0,59 c	0,63 a	2,99 b	1,22 b	3,58 b	16,53 b	53,07 a	1,43 ab
	EUC	4,71 b	0,97 ab	0,25 b	0,04 a	1,22 ab	0,62 a	3,31 a	1,38 b	4,53 a	25,11 b	20,13 b	1,91 a
	MAN	4,48 bc	0,65 bc	0,13 c	0,03 ab	0,82 bc	0,56 a	2,77 b	1,85 a	3,59 b	22,1 b	43,50 ab	1,51 ab
	REV	5,29 a	1,18 a	0,40 a	0,01 b	1,54 a	0,29 b	2,23 c	1,83 a	3,77 b	40,27 a	17,39 c	0,96 b
40-60	VNP	4,57 b	0,49 b	0,08 b	0,03 a	0,61 b	0,56 b	2,70 ab	1,18 b	3,31 b	18,36 b	48,95 ab	0,94 a
	EUC	4,54 b	0,66ab	0,14 b	0,02 a	0,84 ab	0,69 a	2,85 a	1,53 a	3,69 a	22,71 ab	46,03 ab	1,09 a
	MAN	4,51 b	0,67 ab	0,09 b	0,02 a	0,69 ab	0,61 a	2,60 b	1,31ab	3,29 b	20,14 b	51,48 a	0,86 a
	REV	4,89 a	0,73 a	0,24 a	0,01 a	0,95 a	0,52 b	2,34 c	1,46 a	3,29 b	28,50 a	36,93 b	0,62 a

¹Potencial hidrogeniônico, ²cálcio trocável, ³magnésio trocável, ⁴potássio trocável, ⁵soma de bases, ⁶alumínio trocável, ⁷acidez potencial, ⁸capacidade de troca de cátions efetiva, ⁹capacidade de troca de cátions potencial, ¹⁰saturação por bases, ¹¹saturação por alumínio e ¹²fósforo disponível. Médias seguidas por letras iguais indicam que não há diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade entre as áreas avaliadas, dentro de cada camada do solo.

No geral, os valores de P foram baixos no solo sob todos os usos. A baixa disponibilidade de P nos solos é problema primordial, uma vez que impacta no desenvolvimento da vegetação (ALMEIDA et al., 2019), tendo influência direta na taxa de crescimento, na produção de matéria seca, área foliar e, consequentemente, assimilação de nutrientes (KULMANN et al., 2022).

Apesar dos baixos valores de sódio (Na^+) encontrados nas áreas em estudo, foi observado o efeito da interação entre os usos do solo e o período de coleta (Figura 5). Foram observadas diferenças significativas apenas nas camadas superficiais (0-10 e 10-20 cm), onde o teor foi maior na área de plantio de eucalipto (EUC) entre os usos, na camada de 0-10 cm (Figura 5a). Em geral, os teores de Na^+ foram maiores na VNP e EUC, quando comparados os usos do solo, já em relação ao período climático, os maiores resultados foram no período seco, em ambas as profundidades (Figura 5).

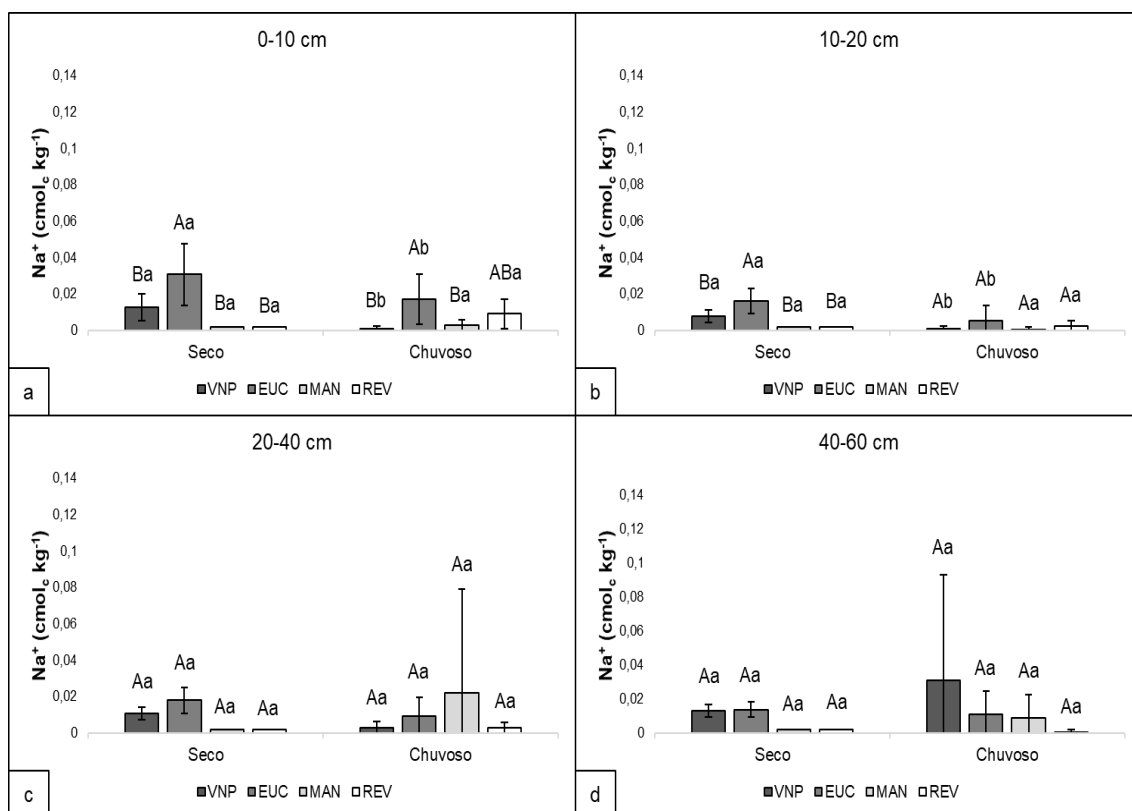


Figura 5 – Teores de sódio trocável em função do uso do solo e dos períodos de coleta, nas camadas de 0-10 cm (a), 10-20 cm (b), 20-40 cm (c) e 40-60 cm (d) de profundidade, em Araripina (PE).

Em que: Letras maiúsculas iguais indicam que não há diferença entre os usos do solo dentro de cada período; letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre os períodos de coleta dentro de cada uso do solo. Ambos comparados pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Apesar do pequeno acréscimo nos valores de Na^+ nas áreas florestais, estes valores ainda se encontram muito baixos. Adicionalmente, no período chuvoso este elemento tende a ser lixiviado, diminuindo ainda mais em comparação ao período seco. No entanto, se houver aumento significativo nos teores de sódio trocável, pode ocorrer dispersão de coloides e sua movimentação dentro do perfil, o que causa declínio na qualidade física do solo, impactando sua estrutura e permeabilidade ao ar e à água (QADIR et al., 2006).

Nas condições da pesquisa, com o baixo teor de Na^+ trocável na área de cultivo de mandioca (MAN) verificado, não ocorre risco de sodificação e salinização no solo. Mesmo assim, é importante salientar que o fator antropogênico é o principal causador da degradação do solo por salinização no semiárido brasileiro, uma vez que os teores naturais desses elementos encontrados em áreas preservadas (VNP) geralmente são considerados baixos (PESSOA et al., 2022). É preciso ter um monitoramento cuidadoso das propriedades físicas dos solos neste ambiente, especialmente quando ocorre a substituição da vegetação nativa por um cultivo, como neste estudo.

Observou-se maior estoque de matéria orgânica do solo (MO) no período chuvoso, em todas as camadas avaliadas (Figura 6 a). Já em relação aos usos do solo, as áreas de EUC e VNP tiveram resultados superiores de MO na primeira camada do solo 0-10, a área de EUC apresentou um aporte maior de MO em todas as camadas avaliadas (Figura 6 b). Nota-se também valores baixos para o uso MAN.

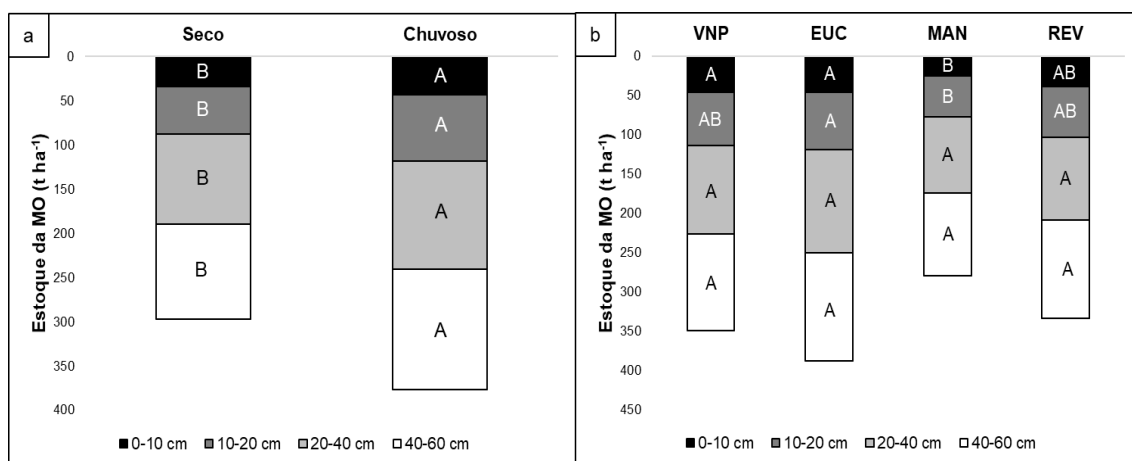


Figura 6 – Estoque de matéria orgânica por camada do solo nas épocas seca e chuvosa (a) e nos usos do solo (b): VNP (vegetação nativa permanente), EUC (eucaliptos), MAN (mandioca) e REV (revegetação), em Araripina (PE). Letras iguais indicam que não há diferença entre os períodos de coleta (a) e entre os usos do solo (b), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O maior aporte de MO nas áreas florestais está relacionado à maior deposição de serapilheira durante todo o ciclo das plantas, isso se torna mais evidente na camada superficial, uma vez que a atividade biológica do solo se encontra mais ativa na superfície. Ao analisar as frações da MO em um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO, Lima et al. (2008) comprovaram que o plantio de Eucalipto de 3 anos contribuiu para o restabelecimento do carbono orgânico, pela sua elevada deposição de serapilheira.

Na vegetação nativa preservada (VNP), a diversidade de espécies florestais é maior, conseqüentemente, haverá uma serapilheira diversificada e microrganismos decompositores distintos (ARENHARDT et al., 2017). Com isso, há maior eficiência na decomposição da matéria orgânica, contribuindo para a ciclagem de nutrientes e sua disponibilização às plantas.

Pode-se relacionar o acúmulo de matéria orgânica na superfície à sua relação direta com o aporte de resíduos orgânicos, como galhos, folhas e cascas de árvores. Estes caem constantemente e formam uma manta orgânica, abaixo da qual são encontradas maiores quantidades de raízes finas, especialmente em áreas de mata nativa (ANDRADE et al., 2022). Vale salientar ainda, que essas alterações químicas observadas para os diferentes usos e estações de coleta, reforçam a fluidez com que o equilíbrio químico do solo pode ser alterado de acordo com o potencial do manejo em alterar as concentrações de elementos e a reatividade do sistema (MOREIRA et al., 2023; NIE et al., 2024).

3.3.3. Atributos Biológicos do Solo

Na figura 7 e-f, observa-se diferença significativa apenas quando se comparou o quociente de mineralização (q-min) entre os períodos climáticos, o qual apresentou-se mais elevado no período seco, em ambas as profundidades.

Geralmente no período seco, há menor disponibilidade de nutrientes para os microrganismos, além de carbono facilmente degradável, gerando estresse ambiental para os microrganismos do solo. Com isso, precisarão de maior gasto de energia para realizar funções biológicas, acarretando um aumento da respiração da biomassa e $q\text{-min}$ alto, que indica maior mineralização do carbono, inclusive no que diz respeito na capacidade de diminuição dos seus estoques (BŁOŃSKA et al., 2020; SILVA et al., 2022).

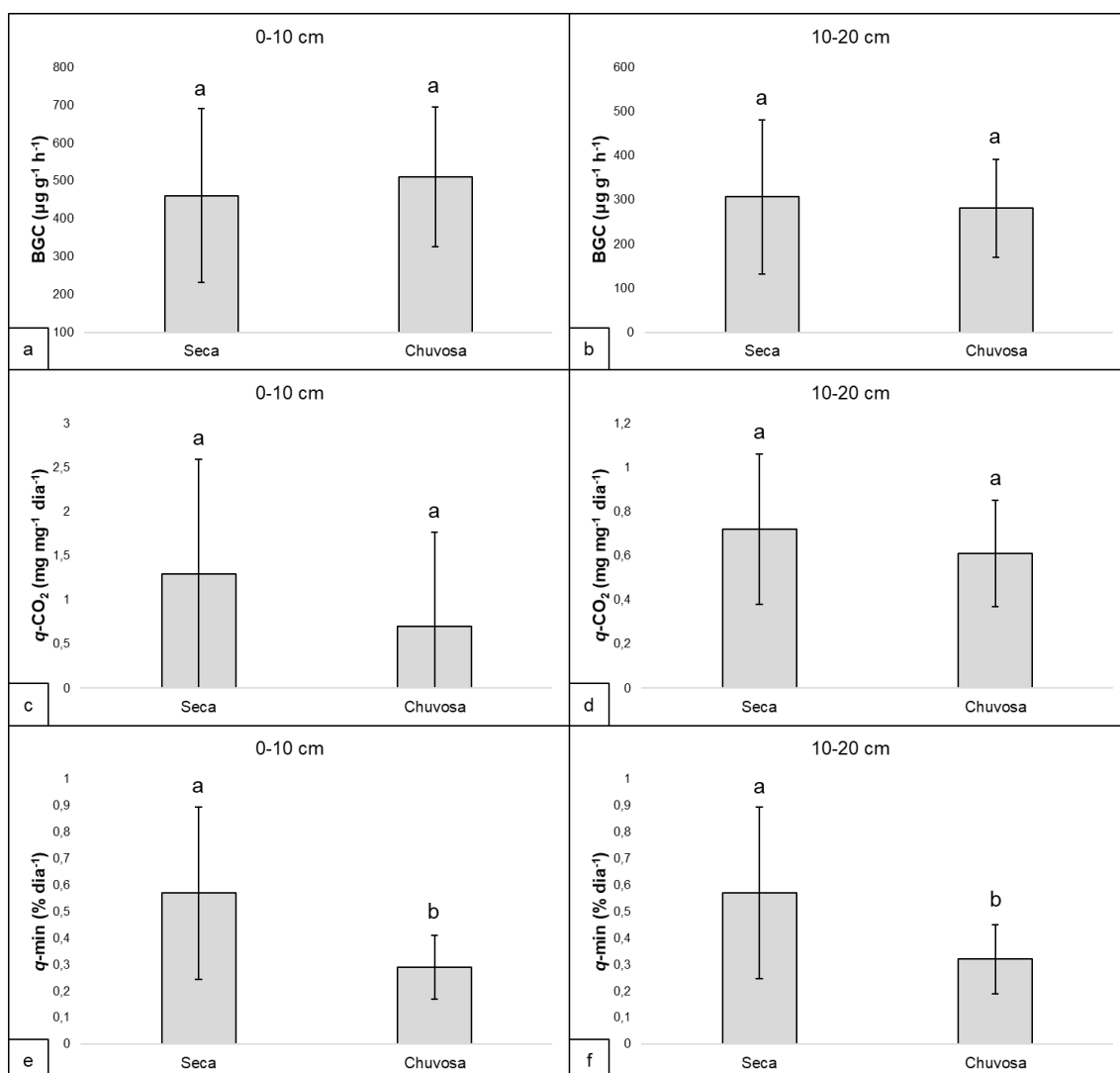


Figura 7 – Atividade da beta-glicosidase (a, b), quociente metabólico (c, d) e quociente de mineralização (e, f) nas diferentes épocas de coleta do solo de cada camada de profundidade coletada, no município de Araripina.

Em que: Letras minúsculas iguais não diferem no teste de Tukey entre os períodos de coleta do solo, a 5% de probabilidade estatística. BGC = atividade da beta-glicosidase, $q\text{-CO}_2$ = quociente metabólico e $q\text{-min}$ = quociente de mineralização

O solo da área de MAN foi o que teve resultado inferior comparado às demais áreas para BGC na profundidade de 0-10 cm. Já a área sob revegetação se sobressaiu em relação às áreas de VNP e MAN, na camada de 10-20 cm. Observou-se que o plantio de mandioca promoveu o menor resultado de BGC nas duas camadas avaliadas. Já o q-min foi maior na MAN e menor no EUC, na camada de 0-10 cm (Figura 8).

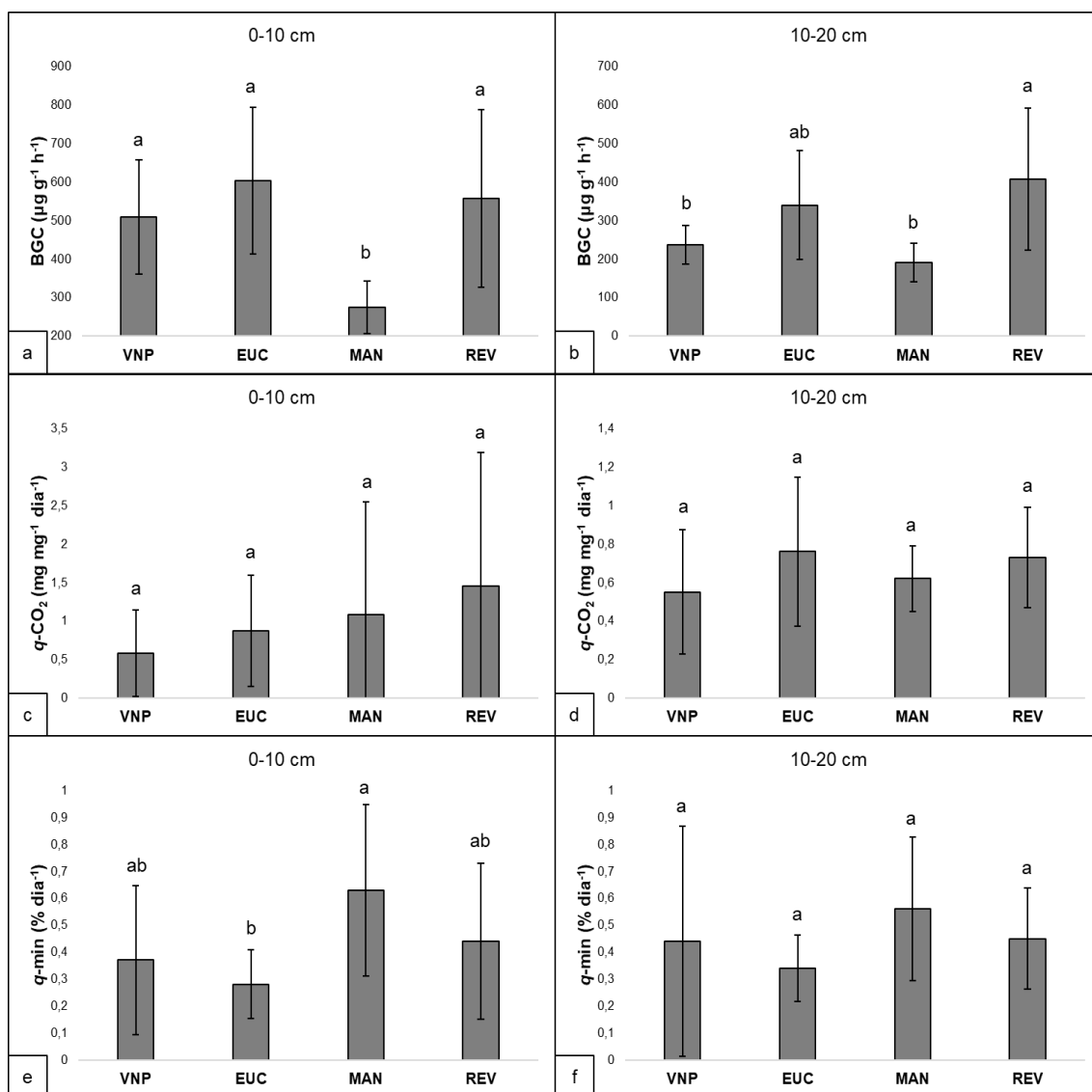


Figura 8 – Atividade da beta-glicosidase (a, b), quociente metabólico (c, d) e quociente de mineralização (e, f) sob diferentes usos do solo, no município de Araripina.

Em que: Letras minúsculas iguais não diferem no teste de Tukey de acordo com os períodos de coleta do solo, a 5% de probabilidade estatística. BGC = atividade da beta-glicosidase, q-CO₂ = quociente metabólico e q-min = quociente de mineralização.

A menor atividade de BGC na área de MAN em comparação aos outros usos está diretamente relacionado ao tipo de vegetação. Esta enzima geralmente se encontra mais ativa em áreas de vegetação perene, a exemplo do EUC, que mantém suas folhas durante todo o ciclo da cultura, consequentemente são áreas com maior acúmulo de biomassa no solo (PAUDEL et al., 2011).

Rocha et al. (2022) encontraram resultados de maior atividade da BGC em solos de manejo agroecológico, em comparação com uma área degradada utilizada como pasto, demonstrando que ao mudar o uso do solo, de uma condição de maior diversidade, como a VNP, para áreas de cultivo agrícola convencional, como a área de MAN, a atividade da beta-glicosidase é prejudicada. O plantio convencional de mandioca produz pouca biomassa vegetal, consequentemente haverá menor carbono orgânico disponível para os microrganismos do solo, impactando na atividade microbiana que está diretamente correlacionada com a enzima beta-glicosidase, sendo ela um indicador chave da decomposição de resíduos.

Já os valores elevados de $q_{\min}$ na área de MAN podem ser associados à decomposição do pouco carbono orgânico de forma mais rápida devido às práticas de manejo pouco conservadoras. Geralmente, sistemas convencionais de manejo do solo, podem afetar negativamente os processos ecológicos (VINHAL-FREITAS et al., 2017). No cultivo convencional como o do plantio da MAN, práticas de aração e gradagem perturbam o solo, acelerando a decomposição da matéria orgânica, acarretando a liberação o carbono para a atmosfera na forma de CO_2 (SIMON et al, 2019).

No período chuvoso, observou-se maiores valores de CBM na VNP (Figura 9 a). A respiração basal (RB) foi menor nas áreas de VNP e REV, no período chuvoso (Figura 9 c). Já o quociente microbiano (q_{mic}) foi maior na área MAN no período seco. Ambos os resultados na camada de 0-10 cm (Figura 9).

Em relação ao CBM, tais resultados podem estar atrelados a dois fatores: maior deposição de material orgânico no solo e condições benéficas para atividade da microbiota. O crescimento microbiano tende a ser favorecido durante o período chuvoso, devido à diminuição da acidez do solo, ao aumento da umidade e à maior disponibilidade de carbono orgânico proveniente da deposição de resíduos vegetais (GUANGMING et al., 2017). Corroborando com

os resultados, Souza et al. (2021) afirmam que maiores valores de CBM ocorrem na presença de elevados teores de carbono orgânico.

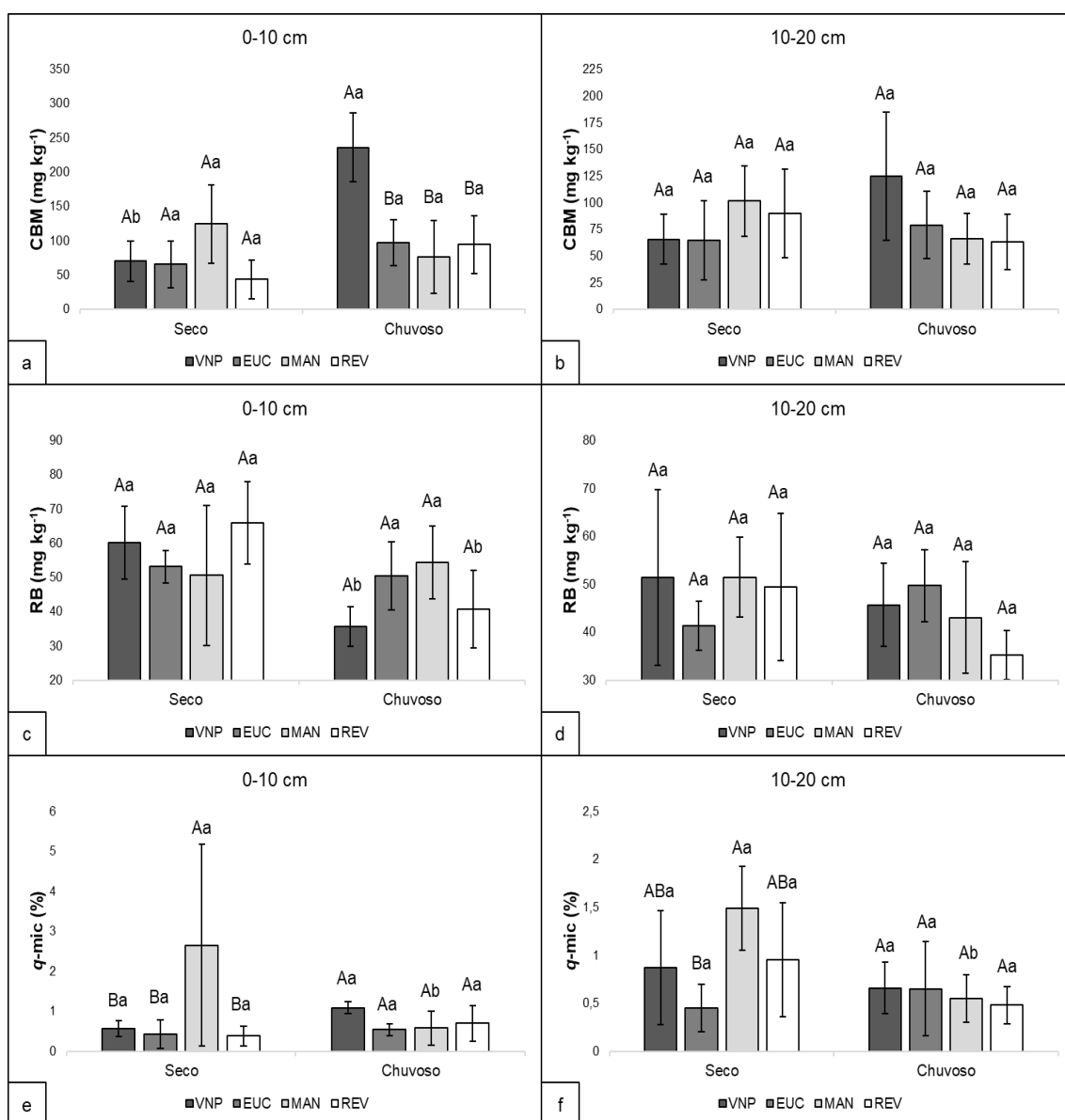


Figura 9 – Carbono da biomassa microbiana (a, b), Respiração Basal (c, d), Quociente microbiano (e, f), sob diferentes usos do solo, no município de Araripina-PB.

Em que: Letras maiúsculas iguais não diferem no teste de Tukey de acordo com o uso do solo em cada período de coleta. Letras minúsculas iguais não diferem no teste de Tukey de acordo com os períodos de coleta para cada uso do solo. Ambos os testes foram realizados a 5% de probabilidade estatística. CBM = carbono da biomassa microbiana, RB = respiração basal e q-mic = quociente microbiano

O quociente microbiano do solo representa a proporção de carbono presente no solo que está retido na biomassa microbiana. Assim, quando esse

índice aumenta, indica-se que mais carbono está sendo incorporado às células dos microrganismos que vivem no solo (VIEIRA et al., 2022). Portanto, a elevação do q-mic durante o mês de menor precipitação, pode estar associada ao aumento da presença de fungos na biomassa microbiana, uma vez que esses organismos apresentam adaptações que favorecem sua sobrevivência em ambientes mais secos (VIEIRA JUNIOR et al., 2020). Esses resultados confirmam a hipótese de que a conversão da VNP compromete os atributos biológicos do solo, especialmente relacionado com a atividade dos microrganismos.

3.3.4. Relações entre os Atributos do Solo

Ao analisar as relações entre as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo em diferentes usos e profundidades de coleta, a extração das duas primeiras componentes principais representou 71,3% da variação do conjunto de dados (Figura 10). Observou-se que a área sob VNP está fortemente associada com os atributos físicos do solo (SIL, Ma, GF, AF, Dp) na camada de 0-10 cm. Já a área sob EUC teve maior relação com as variáveis químicas e biológicas do solo (Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , T, t, SB, PST, q- CO_2 e BGC). Para esta avaliação, utilizaram-se as amostras coletadas apenas no período seco, uma vez que as análises físicas do solo foram feitas nas amostras coletadas neste período climático.

Esta relação pode estar sendo influenciada pela adubação na implantação do eucalipto. A área de EUC foi adubada e preparada com correção química para a implantação da espécie, isso pode explicar a maior relação desse uso com as variáveis químicas. As espécies de eucalipto normalmente têm elevada eficiência de absorção de nutrientes, além disso, possuem alta capacidade de absorção e ciclagem de cátions básicos (MACIEL et al., 2022). Desta forma, a aplicação de calcário pode resultar no aumento do crescimento das plantas, na redução da acidez do solo, servindo também como fonte de cálcio e magnésio para as árvores (ROCHA et al., 2019).

Explicando a relação com atributos biológicos. O eucalipto é uma cultura perene com maior aporte de biomassa vegetal, sendo esse material decomposto e consumido pelos os microrganismo favorecendo o crescimento das

comunidades microbianas (ZHANG et al., 2023). E Consequentemente auxiliando na atividade enzimática. Estudos comprovam que o plantio de eucalipto é muito eficiente no sequestro de C e estoque de carbono orgânico no solo (AMORIM, et al., 2021). Atrelando ainda mais a melhor eficiência da microbiota nesse sistema florestal.

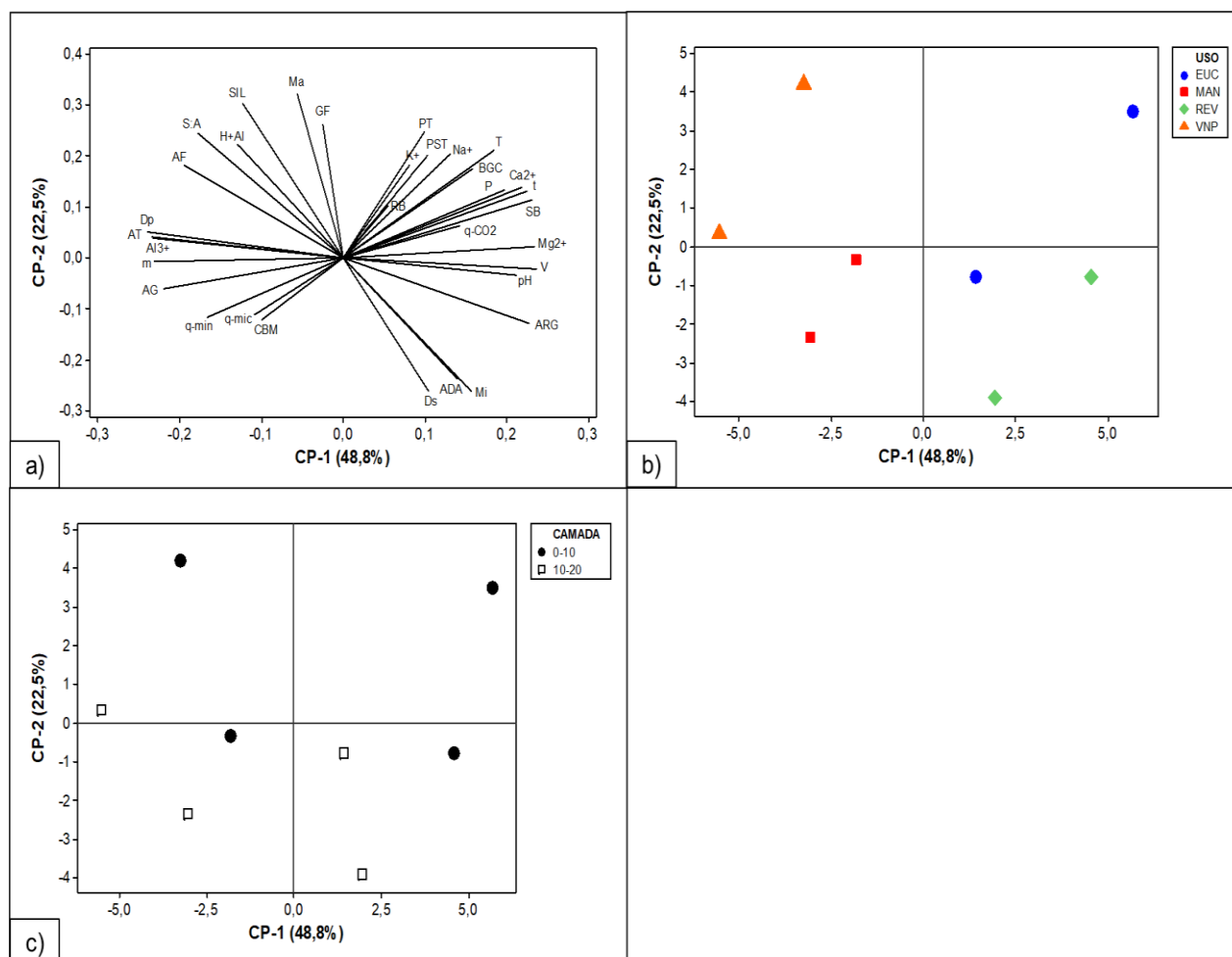


Figura 10 – Análise de componentes principais com base nas relações entre as propriedades físicas, químicas e biológicas de solo sob diferentes usos e profundidades de coleta, no município de Araripina-PE.

Em que: EUC = eucalipto, MAN = mandioca, REV = revegetação, VNP = vegetação nativa preservada, AT = areia total, AG = areia grossa, AF = areia fina, SIL = silte, ARG = argila total, ADA = argila dispersa em água, GF = grau de floculação, PT = porosidade total, Ma = macroporosidade, Mi = microporosidade, Ds = densidade do solo, pH = potencial hidrogeniônico, Ca²⁺ = cálcio trocável, Mg²⁺ = magnésio trocável, K⁺ = potássio trocável, Al³⁺ = alumínio trocável, P = fósforo disponível, V = saturação por bases, m = saturação por alumínio, PST = porcentagem de sódio trocável, H+Al = acidez potencial, T = capacidade de troca de cátions potencial, BGC = atividade da β -glicosidase, CBM = carbono da biomassa microbiana, RB = respiração basal, qCO₂ = quociente metabólico, q-mic = quociente microbiano e q-min = quociente de mineralização.

Quando analisadas as variáveis químicas e biológicas do solo, sob os diferentes usos do solo, períodos climáticos e profundidades avaliadas, a extração das duas componentes principais apresentou 69,7% da variação do conjunto de dados (Figura 11). Observou-se maior relação da área sob EUC com os atributos PST, T, Na^+ , P, Ca^{2+} , t, SB e BGC em ambos os períodos e camadas avaliadas. Já a VNP está associada a um maior teor de Al^{3+} , assim como H+Al, no período úmido (Figura 11).

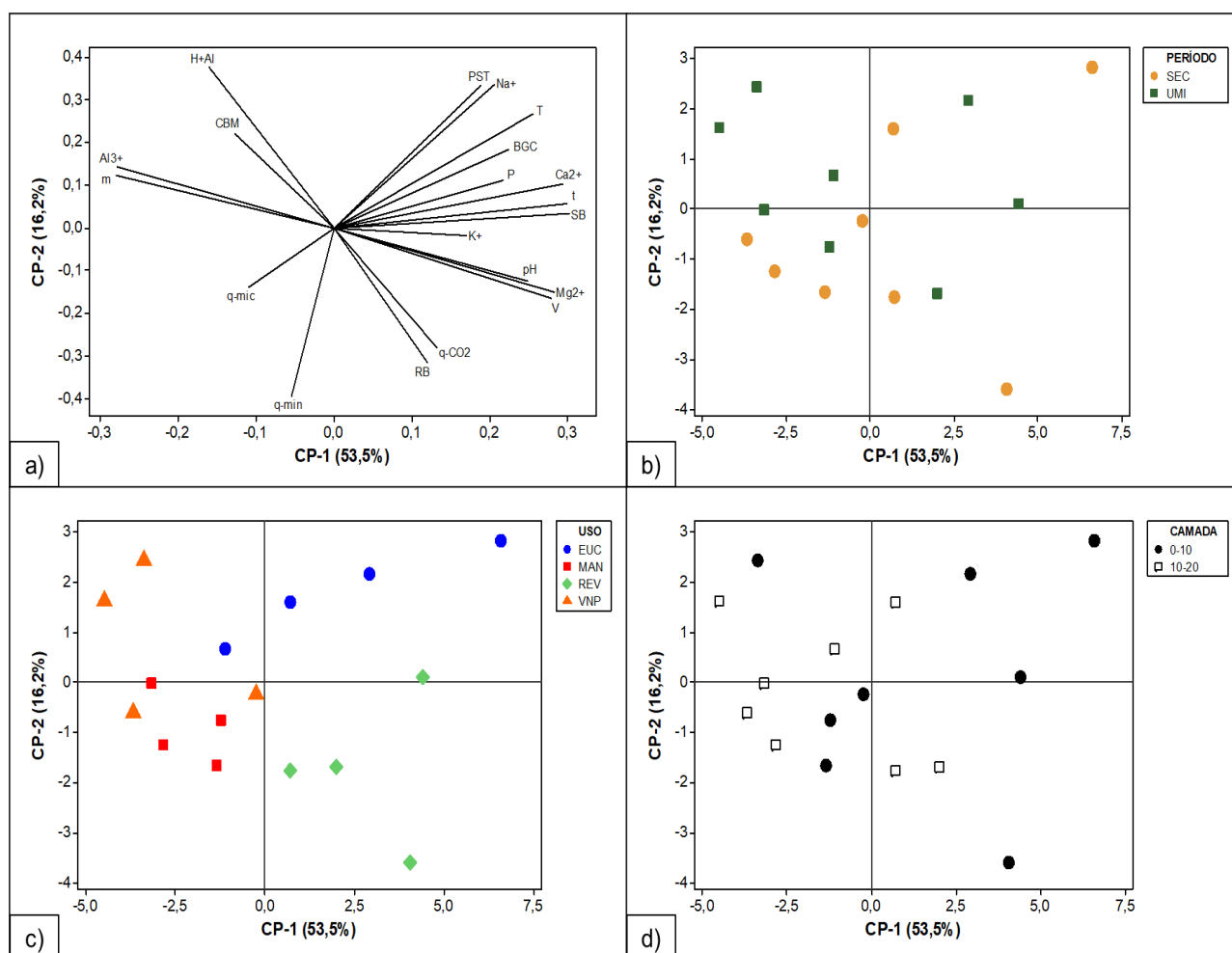


Figura 11 – Componentes principais das relações entre as propriedades químicas e biológicas de solo sob diferentes usos e profundidades de coleta, no município de Araripina-PE.

Em que: SEC = período seco, UMI = período úmido, EUC = eucalipto, MAN = mandioca, REV = revegetação, VNP = vegetação nativa preservada, pH = potencial hidrogeniônico, Ca^{2+} = cálcio trocável, Mg^{2+} = magnésio trocável, K^+ = potássio trocável, Al^{3+} = alumínio trocável, P = fósforo disponível, V = saturação por bases, m = saturação por alumínio, H+Al = acidez potencial, T = capacidade de troca de cátions potencial, BGC = atividade da β -glicosidase, CBM = carbono da biomassa microbiana, RB = respiração basal, qCO₂ = quociente metabólico, q-mic = quociente microbiano e q-min = quociente de mineralização.

Em solos de VNP ou em processo de recuperação, a acidez potencial do solo pode estar relacionada à lixiviação ou à adsorção de cátions de caráter básico do complexo de troca, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ , e o consequente acúmulo de cátions de natureza ácida, como Al^{3+} e H^+ (NOVAK et al., 2021). Oliveira et al. (2015) também verificaram que o solo em áreas de vegetação nativa apresentou forte associação com acidez potencial do solo.

Biologicamente, é importante observar uma correlação positiva entre o CBM com q-mic e q-min (Figura 10 a), essa correlação é uma evidência de melhor eficiência da microbiota no solo (SOUZA et al., 2021). Essa relação inversa pode ser observada no presente estudo, onde os valores de CBM estão maiores na área de VNP (Figura 8 a), e o q-CO₂ apesar de não significativo, foi menor na área de VNP (Figura 7 c).

3.4. Conclusões

Para as alterações dos atributos físicos e químicos do solo de acordo com as mudanças de uso da terra, nota-se no estudo que a VNP e o EUC apresentaram melhor desempenho para os atributos físicos do solo, demonstrando assim ampla capacidade do manejo com espécie florestais em manter a estrutura e permeabilidade do solo. Em contrapartida, para os atributos químicos, os maiores desempenhos foram para os usos EUC e REV, especialmente devido os efeitos corretivos inseridos nesses manejos do solo.

Em relação aos atributos biológicos, o uso MAN foi aquele que obteve os piores desempenhos, seja em relação a atividade enzimática, ou no que condiz a atividade respiratória da microbiota. Esse resultado aponta para o prejuízo que esse tipo de manejo possui sobre os atributos do solo, já que aliado a esse padrão dos atributos biológicos, o uso também contou com os piores desempenhos para os atributos físicos e químicos. Por fim, os usos que tiveram melhor papel na conservação do solo em comparação aos atributos avaliados na VNP foi o EUC, seguido REV e MAN.

Referências Bibliográficas

ADUHE-CHINBUAH, J. et al. No tillage increases SOM in labile fraction but not stable fraction of Andosols from a long-term experiment in Japan. **Agronomy (Basel, Switzerland)**, v. 12, n. 2, p. 479, 2022.

ALMEIDA, J. P. et al. Ectomycorrhizal community composition and function in a spruce forest transitioning between nitrogen and phosphorus limitation. **Fungal ecology**, v. 40, p. 20–31, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2018.05.008>.

ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

AMORIM, V. DA S. S. DE et al. Os benefícios ambientais do plantio de eucalipto: revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. e318101119604, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19604>

ANDRADE, T. G. et al. Carbono no solo e no estrato arbóreo em áreas de manejo de florestas nativas no Cerrado. **Nativa**, v. 10, n. 2, p. 230-236, 2022. <https://doi.org/10.31413/nativa.v10i2.12410>

APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima. [s.d.]. Disponível em: <<http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>>. Acesso em: 10 de setembro de 2024.

ARENHARDT, T. C. P. et al. Influência de diferentes técnicas de restauração ecossistêmica na composição de artrópodes de serapilheira na Mata Atlântica, Brasil. **Revistas Espacios**, Venezuela, v. 38, n. 44, p. 26-41, jun. 2017.

ARIAS-ORTIZ, A. et al. Losses of soil organic carbon with deforestation in mangroves of Madagascar. **Ecosystems**, v. 24, p. 1-19, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10021-020-00500-z>.

ÁVILA, M. A. et al. Structure of natural regeneration in relation to soil properties and disturbance in two swamp forests. **CERNE**, v. 22, n. 1, p. 1–10, 2016. <https://doi.org/10.1590/01047760201622012086>.

BARRETO, A. B. et al. Argila dispersa em água e grau de floculação de um Latossolo sob gramíneas no Brejo da Paraíba (Brasil). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 7, n. 3, 2019. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3575228>.

BŁOŃSKA, E.; LASOTA, J.; SILVA, G. R. V.; VANGUELOVA, E.; ASHWOOD, F.; TIBBETT, M.; WATTS, K.; LUKAC, M. Soil organic matter stabilization and carbon-cycling enzyme activity are affected by land management. **Annals of Forest Research**, v. 63, n. 1, p. 71-86, 2020.

CAVALCANTE, D. M. et al. Physical soil quality indicators for environmental assessment and agricultural potential of Oxisols under different land uses in the

Araripe Plateau, Brazil. **Soil & tillage research**, v. 209, n. 104951, p. 104951, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104951>.

CHAVES, E. et al. Propriedades físicas de um Argissolo após 17 anos de florestamento com Eucalyptus spp. **Research, Society and Development**, v. 10, 2021. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i5.14424>.

Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM). Anuário Mineral Brasileiro –AMB. DIDEM. 2018.

KULMANN, M. S. et al. Morphological and physiological parameters influence the use efficiency of nitrogen and phosphorus by Eucalyptus seedlings. **New forests**, v. 53, n. 3, p. 431–448, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09864-z>.

FENTIE, S. F. et al. Land use and land cover dynamics and properties of soils under different land uses in the Tejibara watershed, Ethiopia. **The Scientific World Journal**, v. 2020, p. 1–12, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1479460>.

FONTENELE, N. DE M. et al. Volumetric and economic evaluation of Eucalyptus spp. clones in high forest, coppice and native vegetation systems at the Gypsum Pole of Araripe - PE. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 117, 1 mar. 2018. <https://doi.org/10.18671/scifor.v46n117.07>.

GUANGMING, L.; ZHANG, X.; XIUPING, W.; SHAO, H. Soil Enzymes as indicators of saline soil fertility under various soil amendments. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 237, p. 274-279, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.004>

ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. APA da Chapada do Araripe. 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/icmbio/ptbr/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/caatinga/lista-deucs/apa-da-chapada-do-araripe>> Acesso em 10 set. 2024

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility Soils**, v. 27, p. 408-416, 1998.

JENSEN, J. L. et al. Relating soil C organic matter fractions to soil structural stability. **Geoderma**, v. 337, p. 834-843, 2019.

JIANG, Z. Z. Wang, Z. Liu. Quantitative study on spatial variation of soil erosion in a small watershed in the loess hilly region. **Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation**, v. 2, p. 1-9, 1996.

LAL, R. Soil organic matter and water retention. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 5, p. 3265-3277, 2020.

LIMA, A. M. N. et al. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no vale do Rio Doce - MG. **Revista Brasileira de Ciência**

do Solo, Viçosa - MG, v. 32, n. 3, p. 1053-1063, 2008.
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300014>.

MACIEL, J. C.; DUQUE, T. S.; FERREIRA, E. A.; ZANUNCIO, J. C.; PLATA-RUENDA, A.; SILVA, V. P.; SILVA, D. V.; FERNANDES, B. C. C.; BARROS JÚNIOR, A. P.; SANTOS, J. B. Growth, nutrient accumulation, and nutritional efficiency of a clonal eucalyptus hybrid in competition with grasses. **Forests**, v. 13, n. 8, p. 1157, 2022.

MARTINS, A. F. et al. Physical, chemical, and microbiological properties of soil under different plant covers in the seridó desertification region in the Brazilian semiarid. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 43, p. e0180162, 2019.
<https://doi.org/10.1590/18069657rbs20180162>.

MCFARLAND, Mark L. et al. Managing soil acidity. Texas Agricultural Experiment Station. SCS-2001-05, 2024.

MOREIRA, W. K. O. et al. Methods to recommend corrective measures for agricultural soils: a systematic literature study. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 54, n. 8, p. 1102-1133, 2023.
<https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2137194>.

NIE, X. et al. Advances in Soil Amendments for Remediation of Heavy Metal-Contaminated Soils: Mechanisms, Impact, and Future Prospects. **Toxics**, v. 12, n. 12, p. 872, 2024. 10.3390/toxics12120872.

NOVAK, E. et al. Composição química do solo em diferentes condições ambientais. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 1063-1085, 2021.
<https://doi.org/10.5902/1980509828995>

NUNES, H. B. et al. Variations in the yoder method and its implications in cerrados soils with different textures. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 4, p. 2970–2989, 2020.
<https://doi.org/10.34188/bjaerv3n4-019>.

OLIVEIRA, I. A. et al. Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Acta amazônica**, Manaus, v. 45, n. 1, p. 1-12, 2015.
<https://doi.org/10.1590/1809-4392201400555>

OLIVEIRA, K. K. G. **Análise da capacidade de troca de cátions e saturação por bases dos solos nas áreas de produção agroecológica em Mossoró-RN**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO, 2024

PAUDEL, B. R.; UDAWATTA, R. P.; ANDERSON, S. H. Agroforestry and grass buffer effects on soil quality parameters for grazed pasture and row-crop systems. **Applied Soil Ecology**, v. 48, n. 2, p. 125-132, jun. 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.04.004>.

PESSOA, L. G. M. et al. Assessment of soil salinity status under different land-use conditions in the semiarid region of Northeastern Brazil. **Ecological indicators**, v. 141, n. 109139, p. 109139, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109139>.

PLUER, E. G M. et al. Returning degraded soils to productivity: Water and nitrogen cycling in degraded soils amended with coarse woody material. **Ecological engineering**, v. 157, p. 105986, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105986>.

QADIR, M. et al. Sodicity-induced land degradation and its sustainable management: problems and prospects. **Land Degradation and Development**, v. 17, n. 6, p. 661–676, 2006. <https://doi.org/10.1002/ldr.751>

REZENDE, S. J. et al. Impact of deforestation on the soil physical and chemical attributes, and humic fraction of organic matter in dry environments in Brazil. **iForest- Biogeosciences and Forestry**, v. 6, pág. 465, 2022. <https://doi.org/10.3832/ifor4016-015>.

ROCHA, J. H. T et al. Growth dynamics and productivity of an Eucalyptus grandis plantation under omission of N, P, K Ca and Mg over two crop rotation. **Forest Ecology and Management**, v. 447, p. 158-168, 2019

ROCHA, A. F. B. et al. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroecológicos no Cerrado Mineiro. **Sociedade & Natureza**, v. 34, p. e62940, 2022. <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-62940>

SIMON, C. DA P. et al. Emissão de co₂, atributos físicos e carbono orgânico total em diferentes sistemas de preparo do solo. **Nativa**, v. 7, n. 5, p. 494–499, 2019. <https://doi.org/10.31413/nativa.v7i5.6273>

SANTOS, W. B. dos et al. Vegetação lenhosa de regiões semiáridas em diferentes altitudes. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 161-175, 2020. <https://doi.org/10.5902/1980509836803>.

SANTOS, J. P. O.; EL-DEIR, S. G. Produção de gesso no Araripe Pernambucano: impactos ambientais e perspectivas futuras. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, v. 12, n. 3, p. 496, 2019. DOI:10.33448/rsd-v12i2.40085.

SANTOS, H. G. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 6. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2025. 1.012 p.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete sample). *Biometrika*, **Great Britain**, v. 52, n. 3, p. 591-611, 1965. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>.

SILVA, P. L. F. DA et al. Qualidade física de solo arenoso em ambiente semiárido sob sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia**

de **Biossistemas**, v. 15, n. 4, p. 598–616, 2021.
<https://doi.org/10.18011/bioeng2021v15n4p598-616>.

SILVA, W. S.; FRACETTO, G. G. M.; FRACETTO, F. J. C.; SILVA, Y. J. A. V.; SOUZA, A. A. B.; NASCIMENTO, C. W. A. The stabilization method of sewage sludge effects soil microbial attributes and boosts soil P content and maize yield in a sludge-amended soil in the field. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 1267-1276, 2022.

SINGH, S. et al. Soil properties changes earthworm diversity indices in different agro-ecosystem. **BMC ecology**, v. 20, n. 1, 2020.
<https://doi.org/10.1186/s12898-020-00296-5>.

SOIL SURVEY STAFF. Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0. Lincoln, NE: USDA-NRCS, 2014.

SOUZA, P. T. de. et al. "Variabilidade espacial da biomassa e atividade microbiana do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta." **Ciência Florestal**. Vol 31.4 p.1949-1967.2021:
<https://doi.org/10.5902/1980509861902>

STOTZKY, G. Microbial respiration. In: "Methods of soil analysis". **Soil Science Society of American**, p. 1550-1572, 1965.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: "Methods of soil analysis: part 2". **Soil Science Society of American**, p. 775-833, 1994.

TAVARES, D. D. et al. Agregação e coeficiente de vulnerabilidade estrutural de um Latossolo sob plantio direto e adubações nitrogenadas e potássicas. **Scientia Plena**, v. 18, n. 7, 2022.
<https://doi.org/10.14808/sci.plena.2022.070204>.

TEIXEIRA P.C. et al. Manual de métodos de análise de solo. EMBRAPA, Brasília, Brasil, p. 573, 2017.

VINHAL-FREITAS, I. C., et al. Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. **Ecological Indicators**, local, v. 74, p. 182-190, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.020>

VIEIRA JUNIOR, et al. Seasonal variation in mycorrhizal community of different Cerrado phytophysiomies. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, p. 1-9, 2020.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.576764>

YANG, Hye; SCHRUMPF, Marion; ZAEHLE, Sönke. Effect of elevated CO2 and soil nitrogen availability on plant C allocation and soil C turnover from a whole-plant mesocosm experiment. In: EGU General Assembly Conference Abstracts. p. 14149, 2023. DOI: 10.5194/egusphere-egu23-14149

YIMAM, A. et al. Effect of Eucalyptus globulus plantations on soil physicochemical properties in the upper Blue Nile, Ethiopia. **Applied and environmental soil science**, v. 2024, p. 1–12, 2024. <http://dx.doi.org/10.1155/2024/8811109>.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>.

YU, Q. et al. Decreased soil aggregation and reduced soil organic carbon activity in conventional vegetable fields converted from paddy fields. **European journal of soil science**, v. 73, n. 2, 2022. <http://dx.doi.org/10.1111/ejss.13222>.

4. CARBONO ORGÂNICO E ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO EM DIFERENTES USOS DA TERRA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Resumo

O carbono orgânico do solo (COS) é fundamental no funcionamento e na manutenção das propriedades do solo, especialmente em relação aos serviços ecossistêmicos que asseguram sustentabilidade ambiental. A relação de seus compartimentos com as demais propriedades do solo merece destaque, especialmente quando contextualizada com diferentes usos da terra. O objetivo desta pesquisa foi avaliar como os diferentes sistemas de uso do solo impactam na sua qualidade ambiental, assim como a importância do COS e de seus compartimentos neste cenário. Foram analisadas quatro áreas: vegetação nativa preservada (VNP), cultivo de eucalipto (EUC), cultivo de mandioca (MAN) e área em revegetação (REV). Amostras de solo foram coletadas em quatro profundidades (0–60 cm) durante os períodos seco e chuvoso, com análises dos teores e estoques do COS. Os resultados obtidos demonstraram que o estoque de carbono orgânico do solo foi superior no período chuvoso ($218,6 \text{ t ha}^{-1}$) em relação ao período seco ($172,4 \text{ t ha}^{-1}$), fato relacionado com a diminuição na taxa de mineralização da matéria orgânica pela microbiota edáfica na estação chuvosa. O estoque do carbono orgânico na camada superficial (0–20 cm) foi superior nas áreas sob os usos VNP ($65,9 \text{ t ha}^{-1}$) e EUC ($69,2 \text{ t ha}^{-1}$) em comparação com MAN ($45,0 \text{ t ha}^{-1}$), resultado que demonstra a capacidade que florestas nativas e plantios de eucalipto têm de aportar resíduo orgânico e aumentar a estocagem de COS. Os compartimentos do COS tiveram relações diretas e indiretas com as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. A qualidade geral do solo foi superior no uso VNP (60,2%), seguido por EUC (61,0%) e REV (62,7%), sendo inferior na área de MAN (54,1%). De forma conclusiva, a pesquisa aponta para a importância do COS e de suas frações no funcionamento do solo e de suas funções, assim como do impacto menor que os usos EUC e REV têm em relação à área sob cultivo de MAN.

Palavras chaves: Mudanças no uso da terra. Solo do semiárido. Funções do solo. Serviços ecossistêmicos. Floresta tropical seca.

4. ORGANIC CARBON AND SOIL QUALITY INDEX IN DIFFERENT LAND USES IN THE BRAZILIAN SEMI-ARID REGION

Abstract

Soil organic carbon (SOC) is essential for soil function and maintenance, particularly for ecosystem services that ensure environmental sustainability. The relationship between its compartments and other soil properties is noteworthy, especially when contextualized with different land uses. The objective of this research was to evaluate how different land use systems impact environmental quality, as well as the importance of SOC and its compartments in this scenario. Four areas were analyzed: preserved native vegetation (VNP), eucalyptus cultivation (EUC), cassava cultivation (MAN), and revegetation area (REV). Soil samples were collected at four depths (0–60 cm) during the dry and rainy seasons, and SOC levels and stocks were analyzed. The results obtained demonstrated that the soil organic carbon stock was higher during the rainy season (218.6 t ha^{-1}) compared to the dry season (172.4 t ha^{-1}), a fact related to the decrease in the rate of mineralization of organic matter by the soil microbiota during the rainy season. The organic carbon stock in the surface layer (0–20 cm) was higher in the areas under VNP (65.9 t ha^{-1}) and EUC (69.2 t ha^{-1}) uses compared to MAN (45.0 t ha^{-1}), a result that demonstrates the capacity of native forests and eucalyptus plantations to contribute organic residue and increase COS storage. The COS compartments had direct and indirect relationships with the physical, chemical, and biological properties of the soil. The overall soil quality was higher in the VNP use (60.2%), followed by EUC (61.0%) and REV (62.7%), and lower in the MAN area (54.1%). Conclusively, the research highlights the importance of COS and its fractions in soil functioning and functions, as well as the smaller impact that EUC and REV uses have on the area under MAN cultivation.

Keywords: Land use change. Semi-arid soil. Soil functions. Ecosystem services. Tropical dry forest.

4.1. Introdução

O carbono orgânico do solo (COS) é um dos principais indicadores de qualidade do solo, inclusive, em região tropical semiárida, onde existem dificuldades no acúmulo e estoque de COS, quando comparada com trópicos úmidos (WIESMEIER *et al.*, 2019). Os estoques de COS são controlados pela adição e remoção da matéria orgânica do solo (MOS), uma vez que a mesma é a principal reserva desse elemento em ambientes naturais (GAVA *et al.*, 2022). Esse estoque é bastante impactado pela mudança do uso do solo, especialmente quando há substituição da vegetação nativa por cultivos agrícolas ou pastagens, reduzindo o COS pela degradação dos mecanismos de proteção do solo e o aumento da atividade microbiana (GIONGO *et al.*, 2020; MENEZES *et al.*, 2021).

A retirada de árvores e, conseqüentemente, a diminuição da serapilheira, impactam negativamente no COS, já que essa seria considerada sua principal entrada no sistema (HE *et al.*, 2023; HEINRICH *et al.*, 2023). Por outro lado, as práticas de manejo inadequadas tendem a aumentar a capacidade de decomposição desses materiais, aumentando suas saídas na forma de dióxido de carbono (CO₂), gás problemático e causador do aquecimento global (LIMA *et al.*, 2020; TAHMOURES *et al.*, 2023). Existem também técnicas de manejo conservacionista que induzem ao incremento dos estoques de carbono orgânico, atuando na paisagem como dreno de CO₂ e mantendo elevada diversidade e atividade microbiana (HAN *et al.*, 2023; GUEVARA, 2024).

O aumento e manutenção dos estoques do COS e de suas frações asseguram importantes funções de qualidade do solo, sobretudo em relação ao seu impacto ecossistêmico na paisagem (PAGE *et al.*, 2020). A elevação do suprimento de água e nutrientes, a capacidade em acelerar e manter o desenvolvimento vegetal e a diversidade edáfica, além da maior capacidade em resistir à degradação, são algumas das funções do solo controladas pela presença do COS (JENSEN *et al.*, 2019; MOREIRA *et al.*, 2023; TAO *et al.*, 2023; NIE *et al.*, 2024; ORESCA *et al.*, 2024). O manejo do solo por meio da silvicultura, atua mantendo os estoques de COS, e indiretamente das funções do solo, em níveis próximos daqueles observados em florestas nativas, desde que contem

com manejo conservacionista (CUNHA *et al.*, 2021; SENA *et al.*, 2023; XUE *et al.*, 2025).

Para compreender a complexa dinâmica do COS existe a possibilidade de realizar diferentes tipos de fracionamentos, com cada fração resultante detendo alguma característica com o solo (LAVALLEE *et al.*, 2020; ROULIA, 2024). De modo geral, existem frações lábeis e recalcitrantes quando o carbono está associado a compostos mais e menos decomponíveis respectivamente, que podem estar desprotegidas ou protegidas de acordo com a sua relação com as condições físicas, químicas e biológicas do solo (BAILEY *et al.*, 2019; CARVALHO *et al.*, 2023). Essa proteção eleva a estabilidade do COS, entretanto tanto atua na indisponibilidade do mesmo para o ataque microbiana, podendo atuar como filtro ambiental, por limitar a disponibilidade de substrato mais lábil, podendo reduzir a diversidade e atividade microbiana (LEHMANN *et al.*, 2020).

Existe fluxo aberto entre esses compartimentos do COS e a paisagem onde o solo está inserido, com o manejo e a mudança no uso da terra atuando na modificação positiva ou negativa desse fluxo. Dessa forma, o objetivo deste capítulo busca avaliar como o COS e suas frações estão relacionados com a qualidade e as propriedades do solo, assim como a mudança no uso do solo e na profundidade de coleta moldam a dinâmica de seus estoques, além de fornecer subsídios para manejo sustentável do solo em regiões semiáridas.

4.2. Materiais e Métodos

4.2.1. Caracterização e histórico de uso das áreas

O estudo foi realizado em áreas localizadas dentro da Unidade de Conservação da Chapada do Araripe, protegida como uma Área de Proteção Ambiental (APA) de uso sustentável, no município de Araripina, extremo oeste do estado de Pernambuco (Figura 1). Segundo o ICMBIO (2019), a área total do território Chapada do Araripe é 972.605,18 hectares, situada entre as coordenadas geográficas 7°34'34" Sul de latitude e 40°29'54" Oeste de longitude, nos Estados do Pernambuco, Ceará e Piauí.

A vegetação é basicamente composta pela fitofisionomia "Carrasco", vegetação caducifólia seca encontrada na Caatinga, com indivíduos de pequeno

porte de altura (± 4 m), com presença de muitas lianas, terreno plano e solo arenoso (SANTOS *et al.*, 2020).

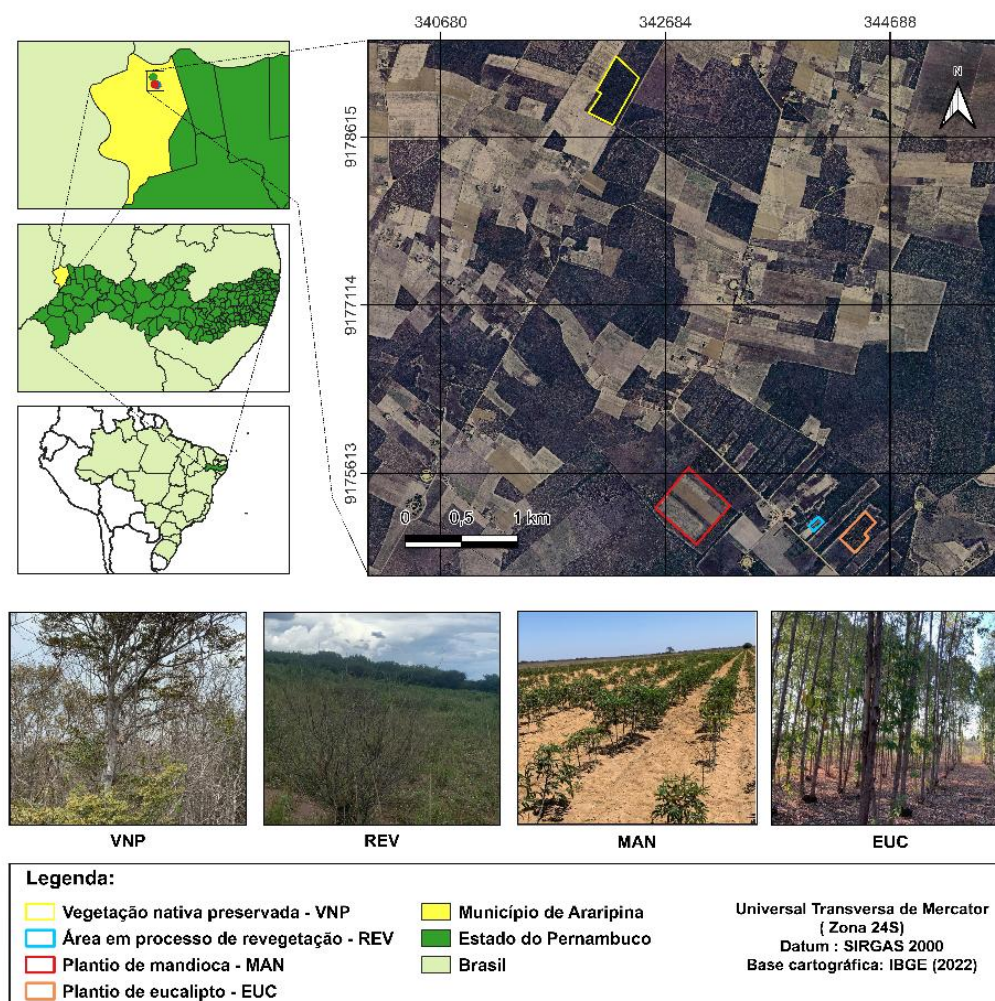


Figura 1 – Mapa de localização do município de Araripina-PE, e das áreas estudadas.

Fonte: Autor, 2025.

Como fonte de estudos, foram utilizadas quatro áreas, todas localizadas na mesma posição de relevo (plano) e nas proximidades da Estação Experimental do IPA (Instituto Agrônomo de Pernambuco), sob condições específicas de uso do solo (Tabela 1). Em todas as áreas de estudo, o solo foi classificado como LATOSSOLO AMARELO Distrófico (SANTOS *et al.*, 2025), correspondente ao Oxisol (Soil Survey Staff, 2014), com textura franco arenosa.

Segundo a classificação de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013), a região tem clima semiárido quente, tipo estepe com chuvas de verão-outono. A temperatura

média anual é de 24 °C e a precipitação média anual é de 759 mm (APAC, 2024). Possui topografia plana, com altitude variando de 828 a 837 m acima do nível do mar (REZENDE et al., 2022).

As coletas de dados em campo foram realizadas em períodos climáticos distintos (seco e chuvoso). A Figura 2 apresenta a pluviosidade entre os anos de 2021 e 2023, sendo as coletas realizadas em setembro de 2022 e abril de 2023, levando em consideração o final do período seco e chuvoso, respectivamente. Dados adquiridos na estação pluviométrica do IPA.

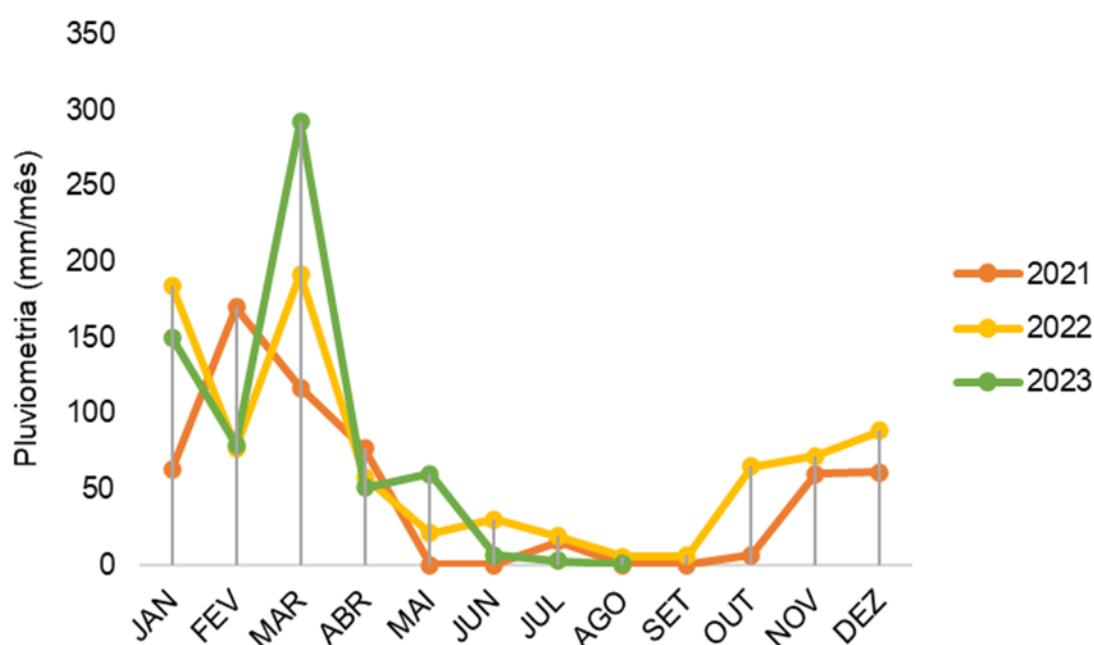


Figura 2 – Pluviosidade mensal (mm) durante o período de coleta de dados, em Araripina – PE, dados coletados em estação meteorológica adjacente às instalações do IPA (Instituto Agrônomo de Pernambuco).

Para as análises relacionadas ao estoque de carbono do solo, utilizaram-se todas as áreas de amostragem (VNP, EUC, MAN e REV). Já para avaliação de carbono e nitrogênio na serapilheira, foram usadas apenas as áreas onde havia aporte de resíduos orgânicos sobre o solo (VNP e EUC), na mesma posição de relevo e nas proximidades do IPA. Em todas as áreas de estudo, o solo foi classificado como LATOSSOLO AMARELO Distrófico (SANTOS *et al.*, 2018), correspondente a Oxisol, segundo STAFF (2014).

4.2.2. Atributos do solo

Os atributos físicos e químicos do solo foram avaliados conforme está descrito no Capítulo 3 da tese. O solo foi coletado em 4 profundidades (0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm), com amostra composta dentro de 8 parcelas para cada uso do solo, tanto no período seco, quanto no período chuvoso, totalizando ao final 256 amostras independentes para cada profundidade. As amostras deformadas foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de malha de 2,0 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA).

Posteriormente, os teores de COT das amostras foram determinados por combustão em via úmida. Para tal, foram utilizados cerca de 0,5 g de solo macerado e passado em peneira de 60 mesh, pelo método da oxidação da matéria orgânica pelo dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$ 0,0667 mol L⁻¹) e ácido sulfúrico (H₂SO₄), com posterior titulação na presença de ferroin 0,025 mol L⁻¹, e sulfato ferroso amoniacal (YEOMANS & BREMNER, 1988).

Os estoques do COT no solo foram calculados em cada camada e área estudada (Eq. 1), seguindo o método proposto por (VELDKAMP, 1994).

$$EstC = \frac{(CO \times Ds \times e)}{10} \quad (1)$$

onde:

EstC = estoque de C orgânico em determinada camada de solo (t ha⁻¹)

CO = teor de C orgânico total na camada amostrada (g kg⁻¹)

Ds = densidade do solo na camada (kg dm⁻³)

e = espessura da camada considerada (cm)

Posteriormente, os resultados foram corrigidos levando-se em conta as diferentes massas de solo, partindo do pressuposto que a relação entre a densidade do solo e a espessura da camada permanece constante em comparação ao solo de referência (VELDKAMP, 1994). Seguindo este método, a correção foi feita para cada camada estudada, corrigindo-se a espessura da

mesma em relação à área de referência - AVNP (Eq. 2) (MORAES *et al.*, 1996; VELDKAMP, 1994).

$$EstC = \frac{Cs * Ds \left(\frac{Dref}{Ds} * e \right)}{10} \quad (2)$$

onde:

EstC = estoque de C orgânico em determinada camada de solo (t ha⁻¹)

Cs = teor de C orgânico total na camada avaliada (g kg⁻¹)

Ds= densidade do solo na camada avaliada (kg dm⁻³)

Dref = densidade do solo na camada avaliada da área de referência (kg dm⁻³)

e = espessura da camada considerada (cm)

Em relação ao fracionamento físico do carbono, foram utilizados os métodos descritos por Cambardella & Elliot (1992), onde foi separada a fração de carbono particulado (FPO) e, por diferença com o COT, foi estimada a fração associada aos minerais de silte e argila (FAM). Enquanto isso, o fracionamento químico do carbono foi realizado conforme Swift (1996), pela separação das frações de ácidos fúlvicos (FAF), de ácidos húmicos (FAH), das huminas (FHU) e, por diferença com o COT, foi estimado o teor das frações não húmicas (FNH). Os teores de carbono orgânico das frações foram obtidos pela dosagem por meio de via úmida.

4.2.3. Determinação do índice de qualidade do solo (IQS)

A maior parte das propriedades avaliadas foram utilizadas na obtenção dos índices de qualidade do solo (IQS) geral, física, química e biológica, assim como na construção de processos ecossistêmicos para assegurar as funções de desenvolvimento vegetal, suprimentos de água e nutrientes, atividade biológica, resistência à degradação e mitigação climática. O peso das propriedades de cada IQS do modelo (ANEXO A), foi escolhido e ponderado em relação a sua influência sobre cada processo.

Os valores da função de pontuação de cada propriedade (ANEXO B), foram baseados em padrões da literatura. A construção destes modelos, seus pesos e funções das propriedades foram propostos e alterados conforme Karlen; Stott (1994), Karlen *et al.* (1997), Glover *et al.* (2000), Islam & Weil (2000), Chaer (2001), Cardoso *et al.* (2009), Marion *et al.* (2022), Santiago *et al.* (2018).

4.2.3. Análises de dados

Inicialmente, os dados foram testados para normalidade e homogeneidade, como pressupostos necessários para análise de variância (ANOVA). Para isso, foram utilizados os testes de Shapiro; Wilk (1965) e Bartlett Test, respectivamente. Quando significativos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Realizou-se a análise estatística multivariada, com a técnica de análise de componentes principais (ACP), pela extração dos dois primeiros componentes. Para as análises, foram utilizados os softwares Sisvar e Minitab.

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. Estoque de carbono no solo

O estoque de carbono orgânico total no solo variou em função do período de amostragem (Figura 3a) e em função do uso adotado (Figura 3b). No entanto, a interação período de coleta e uso do solo não foi significativa. O estoque de carbono orgânico foi 21,14% superior no período chuvoso em relação ao período seco (Figura 3a). Especialmente em regiões áridas e semiáridas, a temperatura do ar se torna um fator limitante para a produção e decomposição de compostos orgânicos. Em condição de altas temperaturas, e especialmente sobre a baixa umidade do solo, o efeito da decomposição dos materiais orgânico se torna mais lento (PALLANDT *et al.*, 2025).

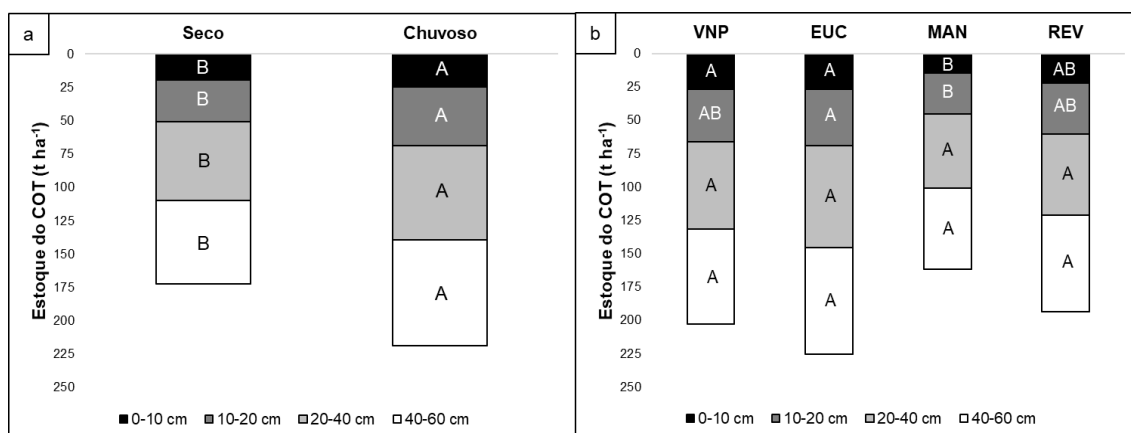


Figura 3 – Estoque de carbono orgânico por camada do solo nas épocas seca e chuvosa (a) e nos usos do solo (b), em Araripina (PE).

Em que: VNP (vegetação nativa permanente), EUC (eucaliptos), MAN (mandioca) e REV (revegetação). Letras iguais indicam que não há diferença entre os períodos de coleta dentro de cada camada (a) e entre os usos do solo dentro de cada camada (b), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tomar & Baishya (2020) ressaltaram que a dinâmica do carbono no solo é desafiadora em ecossistemas de semiárido devido a seus ciclos secos-úmidos, com fortes precipitações sazonais, causando estresse em solos florestais. Corroborando os resultados apresentados, esses pesquisadores observaram no semiárido da Índia, maiores valores de estoque de carbono no período de chuvas. Este resultado pode estar relacionado com o aumento da ciclagem do material de serapilheira neste período, que decorre da elevação da umidade, condição necessária para acelerar a atividade microbiana do sistema e elevar a decomposição e humificação da matéria orgânica no solo (SEMENOV *et al.*, 2013; PENG *et al.*, 2022).

Almeida *et al.* (2021) observaram em resultados obtidos no Cerrado brasileiro uma estabilidade da biomassa microbiana do solo na estação chuvosa, evidenciada pelos baixos valores de qCO_2 . Portanto, menos C foi perdido pela respiração, havendo maior acúmulo de C no tecido microbiano por processos de imobilização (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Este carbono retido no tecido microbiano será disponibilizado ao solo, auxiliando no maior estoque durante a estação chuvosa (ZHOU *et al.*, 2024). Apesar do estudo ter sido realizado em outro bioma, o processo de retenção de carbono no tecido microbiano e, logo após seu aporte ao solo, é o mesmo para a Caatinga.

Vários autores encontraram resultados significativos de estoque de carbono em períodos mais úmidos, no entanto, outros evidenciam a importância dos períodos mais quentes para o estoque de carbono em regiões semiáridas, devido à fotodegradação de resíduos orgânicos (SILVA *et al.*, 2017; MENDES *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2024; TOMAZ *et al.*, 2024). Nas regiões semiáridas, desertos, pastagens e savanas, a fotodegradação também é um fator importante, uma vez que controla, parcialmente, a decomposição de resíduos, já que são ambientes com regime hídrico limitante. Em condições de seca, a radiação solar aumenta a decomposição (HUSSAIN *et al.*, 2023).

Os valores de estoque de carbono no solo sob os diferentes usos demonstraram que os teores foram maiores nos solos sob vegetações florestais, com plantio de EUC e VNP nas camadas superficiais (Figura 3b). E o menor resultado foi observado na área sob cultivo agrícola de MAN. Esses resultados já eram esperados, uma vez que as áreas florestais possuem maior produção de serapilheira decorrente das copas das árvores e possibilitam uma proteção mais intensa destes resíduos sobre o solo (MOURA *et al.*, 2016).

Além das condições climáticas, as práticas agrícolas se destacam sobre o processo de decomposição, efluxo de CO₂ e o aporte de C no solo. Quando ocorre um sistema conservacionista, as condições serão mais adequadas para mecanismos de agregação, permeabilidade, decomposição, condensação e polimerização, favorecendo a formação de substâncias húmicas mais estáveis no solo (EBELING *et al.*, 2011). Isso fica evidente quando se observou estoques de carbono 28,10% e 20,03% em áreas florestais (EUC) e preservadas (VNP) respectivamente, em comparação à área com atividade agrícola anual (MAN).

Corroborando os resultados apresentados, Menezes *et al.* (2021) observaram na Caatinga da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, que a mudança da floresta nativa para pecuária e uso agrícola causou redução de mais de 50% nos estoques de carbono. Os autores ainda discutem sobre o impacto dessa conversão em funções importantes do solo, como ciclagem de nutrientes e água, bem como na perda da capacidade de mitigação do CO₂ como gás de efeito estufa, já que o solo passa a ser fonte deste para a atmosfera. Nesse sentido, os menores estoques observados no uso MAN devem estar relacionados com essas alterações nos atributos e funções do solo.

O maior aporte de matéria orgânica é essencial para o funcionamento do solo. Gomes *et al.* (2021a; 2021b) afirmaram que quanto maior o estoque de carbono no solo na forma de matéria orgânica, maior será a ação dos microrganismos do solo e a retenção de umidade, e mais nutrientes estarão disponíveis para as plantas. Isso porque o carbono atua como elemento chave para a manutenção do ecossistema, já que molda todas as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, assim como mantém os processos do solo na paisagem (MURPHY, 2015; WIESMEIER *et al.*, 2019).

Os atributos físicos e químicos do solo também estão diretamente relacionados com o estoque de carbono, uma vez que modificações nesses atributos interferem diretamente na dinâmica do C. Geralmente, solos com menor teor de argila têm menor aptidão à proteção do material orgânico, física e quimicamente (GIONGO *et al.*, 2020). Nos resultados apresentados, os maiores estoques de carbono na zona superficial dos usos EUC e VNP possuem a menor densidade em comparação ao uso MAN. A maior densidade do solo no cultivo de mandioca atrelada à menor quantidade de material orgânico, são fatores que favorecem a redução do estoque de carbono nas camadas superficiais do solo (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2013).

Andrade *et al.* (2020), em pesquisas no semiárido brasileiro, observaram resultados semelhantes aos aqui apresentados, ao comparar as profundidades e os usos de solo. Os maiores valores de carbono orgânico total foram encontrados na superfície e em ambientes mais preservados. Os mesmos autores reforçam que, no geral, a maior quantidade do carbono orgânico total nas camadas superficiais ocorre devido à constante deposição dos resíduos orgânicos. Tais fatos deixam evidente que a conversão dos ambientes florestais para cultivos agrícolas causa impactos no estoque de carbono do solo, respondendo às hipóteses sugeridas no trabalho.

4.3.2. Fracionamento do carbono no solo

Quando analisadas as frações do carbono orgânico do solo frente às variáveis físicas e químicas nas diferentes camadas de coleta do solo, a extração das duas primeiras componentes principais representou 70,9% da variação do

conjunto de dados (Figura 4). Todas as frações do carbono tiveram relação com as camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade do solo, apenas a fração dos ácidos fúlvicos (FAF) que teve vetor menor e mais semelhante a todas as camadas. Enquanto isso, variáveis como AF, ADA, Ds, Mi e Al^{3+} , tiveram relação com as camadas de 20-40 e 40-60 cm de profundidade.

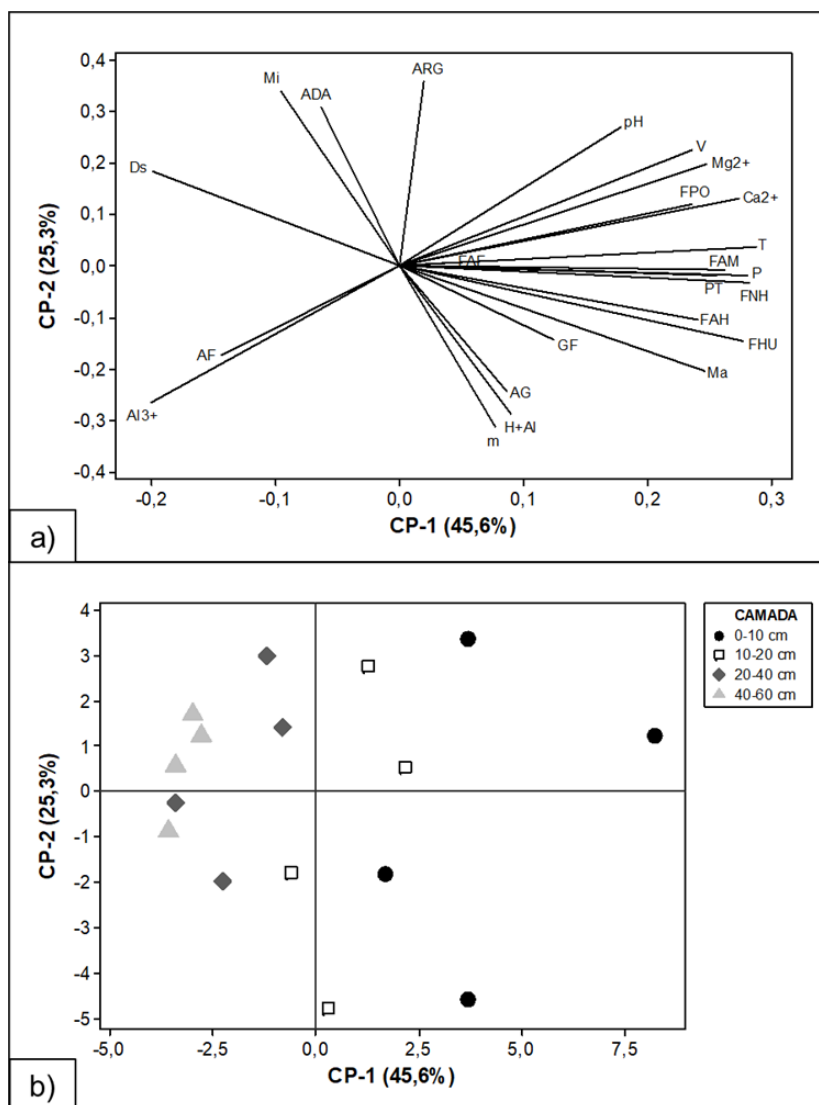


Figura 4 – Análise de componentes principais com base nas relações entre as propriedades do solo e as frações do carbono orgânico do solo em diferentes usos, no município de Araripina-PE.

Em que: AG = areia grossa, AF = areia fina, ARG = argila total, ADA = argila dispersa em água, GF = grau de floculação, PT = porosidade total, Ma = macroporosidade, Mi = microporosidade, Ds = densidade do solo, pH = potencial hidrogeniônico, Ca^{2+} = cálcio trocável, Mg^{2+} = magnésio trocável, Al^{3+} = alumínio trocável, P = fósforo disponível, V = saturação por bases, m = saturação por alumínio, PST = porcentagem de sódio trocável, H+Al = acidez potencial, T = capacidade de troca de cátions potencial, FPO = fração de carbono particulado, FAM = fração de carbono associada aos minerais, FAF = fração de ácidos fúlvicos, FAH = fração dos ácidos húmicos, FHU = fração de huminas e FNH = fração não humificada.

As camadas superficiais do solo possuem a maior parte das concentrações naturais de carbono orgânico nos ecossistemas, especialmente, por ser a zona mais dinâmica de entrada e alterações dos materiais orgânicos (FRANZLUEBBERS, 2002; BANWART *et al.*, 2019). Nessa zona também se encontram, geralmente, a maior parte da riqueza e abundância de organismos, desde a fauna até os microrganismos, fator crucial para as modificações e ciclagem dos materiais (FUJII *et al.*, 2020, ZHANG *et al.*, 2021). Já horizontes subsuperficiais do solo, tendem a concentrar menos carbono orgânico, pelo fato de sua entrada nessas profundidades ser restrita a fenômenos como bioturbação, translocação de frações dissolvidas em solução ou móveis, ou ainda, pela diminuta ciclagem realizada pela microbiota, quando comparados com horizontes superficiais.

A correção química e o condicionamento físico do solo, geralmente são realizados no manejo das camadas superficiais do solo, onde boa parte das culturas agrícolas dispersam a sua biomassa de raízes (PAGE *et al.*, 2020). Essas modificações no solo levam ao aumento da sua qualidade e ao potencial em estocar mais carbono orgânico devido a elevação da sua estabilidade (HANKE & DICK, 2019). Estes tipos de modificações ocorrem menos em subsuperfície, que ficam evidentes com o aumento da D_s , da porosidade (concentrada em M_i), da diminuição do pH e cátions básicos e do aumento nos teores de Al^{3+} . A FAF presente em comum com todas as camadas está relacionada com a sua maior solubilidade no sistema, devido a sua reatividade e que pode ocasionar mobilidade e transporte no sistema (STEVENSON, 1994; YANG *et al.*, 2025).

A forte relação entre T e a FAM aponta para a capacidade da reatividade do solo em estabilizar determinadas frações do carbono orgânico, já que diversas ligações organominerais podem ocorrer quando se eleva as cargas presentes no complexo de troca (HANKE & DICK, 2019; CARVALHO *et al.*, 2023; ROULIA, 2024). Da mesma forma, houve relação da FAH e FHU com Ma e GF, e do FPO com o Ca^{2+} , algo que deve ter ocorrido pela melhoria da estrutura e da agregação do solo, já que as huminas e as pontes catiônicas possuem a capacidade de melhorar a porosidade e a estabilidade do solo, conseqüentemente, pode ser observada a relação entre formas lábeis como

FNH e PT do solo, com atuação do mecanismo de oclusão em agregados (HANKE & DICK, 2019; SHEN *et al.*, 2021; CARVALHO *et al.*, 2023).

Ao serem analisadas as variáveis que representam as frações de carbono frente às demais propriedades do solo (Figura 5), nota-se que a extração das duas primeiras componentes representou 71,2% da variação dos dados. A VNP foi representada pela Ma, H+Al, AT e m, enquanto a MAN foi representada pela AT, m, q-mic, q-min e CBM. Por outro lado, as frações do carbono tiveram maior relação com o uso EUC, assim como T, P e BGC, além disso, as variáveis q-CO₂, V, pH, ARG, ADA, Mi e Ds foram associadas com o REV.

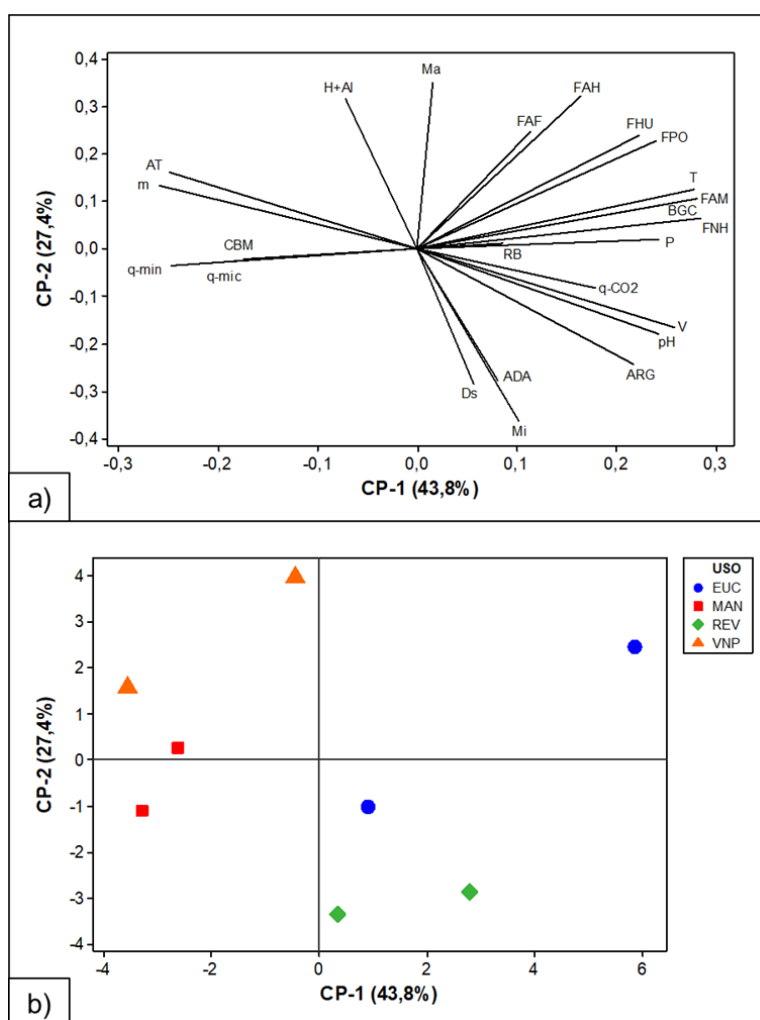


Figura 5 – Análise de componentes principais com base nas relações entre as propriedades do solo e as frações do carbono orgânico do solo sob diferentes usos, no município de Araripina-PE.

Em que: EUC = eucalipto, MAN = mandioca, REV = revegetação, VNP = vegetação nativa preservada, AT = areia total, ARG = argila total, ADA = argila dispersa em água, Ma = macroporosidade, Mi = microporosidade, Ds = densidade do solo, pH = potencial hidrogeniônico,

P = fósforo disponível, V = saturação por bases, m = saturação por alumínio, H+Al = acidez potencial, T = capacidade de troca de cátions potencial, BGC = atividade da β -glicosidase, CBM = carbono da biomassa microbiana, RB = respiração basal, qCO_2 = quociente metabólico, q-mic = quociente microbiano, q-min = quociente de mineralização, FPO = fração de carbono particulado, FAM = fração de carbono associada aos minerais, FAF = fração de ácidos fúlvicos, FAH = fração dos ácidos húmicos, FHU = fração de huminas e FNH = fração não humificada.

A associação do aumento de diferentes frações do carbono orgânico com a cultura do *Eucalyptus* sp. já é bem estabelecida na literatura (GATTO *et al.*, 2010; GATTO *et al.*, 2011; BARBOSA *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2020; CUNHA *et al.*, 2021). Este fato está relacionado à forte produção característica de serapilheira pela cultura (BARBOSA *et al.*, 2017), além de sua capacidade em atuar na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, que aumentam a qualidade do solo e de forma indireta atuam na manutenção do solo como dreno de carbono orgânico (CUNHA *et al.*, 2021; SENA *et al.*, 2023; ZHU & WU, 2023; XUE *et al.*, 2025).

Outra relação foi entre BGC e P com FNH, que provavelmente está atribuída à mineralização das frações mais lábeis do solo pela atividade enzimática dos microrganismos, aumentando assim os teores de fósforo e de outros elementos associados aos compostos orgânicos (KRISHNA & MOHAN, 2017; BAI *et al.*, 2021; PRESCOTT & VESTERDAL, 2021). Além disso, vale salientar que essas frações mais simples que são convertidas podem ser perdidas ou reagirem com o solo, ficando disponíveis em frações lábeis ou sendo estabilizadas em frações protegidas (HANKE & DICK, 2019; LAVALLEE *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2022).

O alicerce da agricultura convencional está na intensificação da produção pelo uso de tecnologias que aumentem a produtividade que, muitas vezes, leva a uma preocupação mínima com o sistema edáfico e suas funções ao longo do tempo (STAVI *et al.*, 2016; LORENZ & LAL, 2018). Isso justifica o resultado encontrado para o uso MAN, com relação contrária à das frações do carbono orgânico, que deve estar associado com a diminuição da melhoria da qualidade do solo devido o manejo empregado nesse tipo de cultivo, além de estar associado com elevada atividade microbiana, que impacta diretamente na diminuição dos estoques do carbono do solo (SILVA *et al.*, 2021).

Em resumo, as áreas de EUC se destacaram pelo acúmulo de frações estáveis, REV por associação com atributos químicos, VNP por acidez e

estabilidade natural e MAN pela perda de frações e maior mineralização. Esses resultados reforçam a hipótese de que a conversão de uso do solo nativo afeta os atributos do solo, sendo mais expressivo para manejo intensivo como observado para o uso MAN.

4.3.3. Índices de qualidade do solo

Em relação ao impacto da profundidade de coleta sobre a qualidade das propriedades do solo (Figura 6a) e das suas funções ecossistêmicas (Figura 6b), verificou-se que a superfície do solo, representada pela camada de 0-10 cm apresentou melhor qualidade para todos os índices quando confrontados com os da camada de 10-20 cm, apenas sendo iguais para a qualidade biológica e a manutenção da homeostase.

O solo é considerado a zona crítica para os ecossistemas terrestres, devido aos processos e funções que desempenha na interface com os outros compartimentos ambientais (BANWART *et al.*, 2019). A camada superficial do solo recebe a maior parte das entradas de carbono orgânico no sistema, além de outros elementos e de água, bem como atua com alto desempenho relacionado com a atividade biológica de vegetais, animais e microrganismos (FRANZLUEBBERS, 2002). Dessa forma, espera-se maior qualidade associada com os horizontes superficiais, assim como obtido nesse estudo para os diferentes usos do solo avaliados.

Quando se aumenta a profundidade, ocorre não apenas a diminuição dos estoques de carbono orgânico, mas também das condições físicas e químicas necessárias para o desenvolvimento biológico, que atuam como filtros ecológicos (SANTOS *et al.*, 2022). O aumento da densidade do solo e dos teores de alumínio trocável, assim como a diminuição da porosidade e dos teores de bases, são exemplos deste tipo de característica de solos em camadas subsuperficiais, que devem ter contribuído para a redução da qualidade do solo em subsuperfície (SANTOS *et al.*, 2022; HLAVANGUANE *et al.*, 2025).

Quando avaliada a qualidade do solo de acordo com os diferentes usos da terra (Figura 7a), observou-se que o índice geral na área sob MAN foi inferior aos demais usos, enquanto a qualidade biológica da VNP foi superior aos demais

usos. Para a qualidade física, a VNP obteve melhor índice quando equiparado com os valores obtidos nos usos MAN e REV. Por fim, para a qualidade química, os usos EUC e REV tiveram qualidade mais elevada do que os usos VNP e MAN.

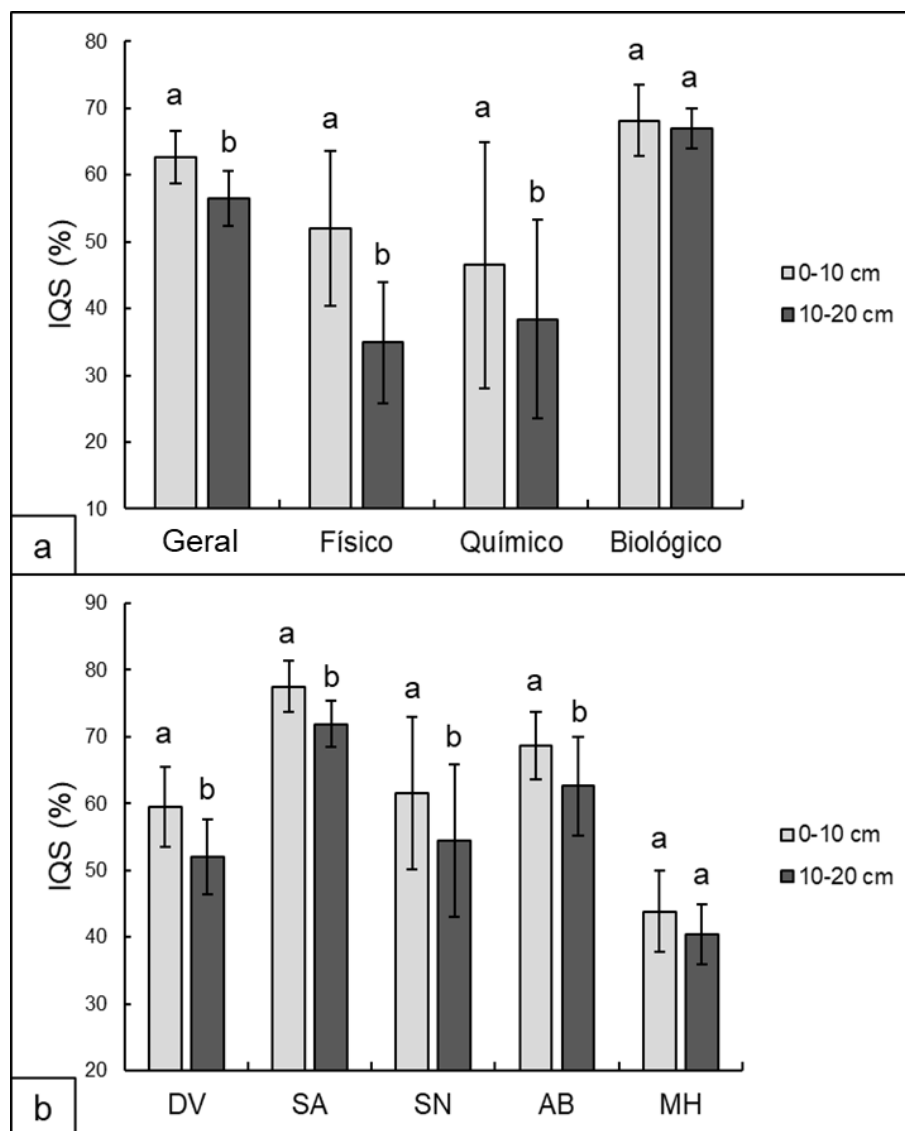


Figura 6 – Índices de qualidade geral e das propriedades do solo (a), e suas funções ecossistêmicas (b) avaliadas em diferentes profundidades, no município de Araripina-PE

Em que: VNP = vegetação nativa preservada, EUC = cultivo de eucalipto, MAN = cultivo de mandioca, REV = área com revegetação, DV = desenvolvimento vegetal, SA = suprimento de água, SN = suprimento de nutrientes, AB = atividade biológica e MH = manutenção da homeostase. Letras minúsculas diferentes significam diferença estatística para o teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Na área sob VNP houve melhor qualidade física e biológica dentre os usos do solo, ainda que não tenha apresentado maior qualidade química (FARIAS *et*

al., 2022), este resultado reflete no potencial que esse tipo de uso tem em manter a elevada qualidade do sistema (RAIESI & BEHESHTI, 2022; HEINRICH *et al.*, 2023; HE *et al.*, 2023). Vale salientar, a ciclagem de nutrientes em áreas nativas ocorre de forma acelerada, ou seja, embora o solo tenha baixa fertilidade, a alta produção de serapilheira somada com a maior qualidade biológica encontrada em VNP, possibilitam a alta ciclagem de nutrientes em solos sob este tipo de uso (GUIMARÃES *et al.*, 2023).

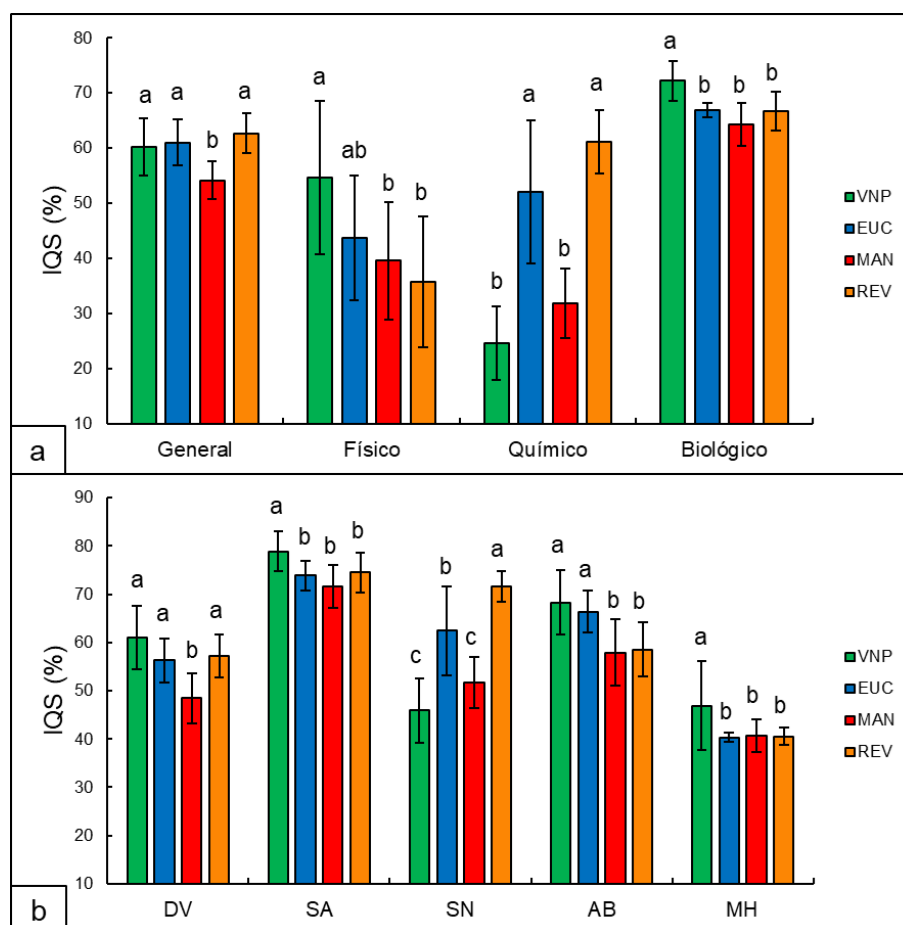


Figura 7 – Índices de qualidade geral e das propriedades do solo (a), e suas funções ecossistêmicas (b) avaliadas em diferentes usos do solo, no município de Araripina-PE

Em que: VNP = vegetação nativa preservada, EUC = cultivo de eucalipto, MAN = cultivo de mandioca, REV = área com revegetação, DV = desenvolvimento vegetal, SA = suprimento de água, SN = suprimento de nutrientes, AB = atividade biológica e MH = manutenção da homeostase.

Por outro lado, foi observado melhor desempenho geral para o EUC e a REV, pois ambos possuem qualidade química mais elevada e, para o caso do

EUC, qualidade física intermediária entre VNP e demais usos. Além destes usos contarem com modificações físicas e químicas realizadas pelo manejo antrópico, que alteram a qualidade por meio de correções e condicionamentos no solo (RODRÍGUEZ *et al.*, 2022), são usos com menor impacto ao solo, fornecendo estímulos como entrada de resíduos orgânicos, maior agregação, diversidade vegetal, entre outras, capazes de manter a mínima qualidade no sistema (CHAVARRIA *et al.*, 2018; ZARAFSHAR *et al.*, 2020; ASHRAF *et al.*, 2022).

O uso MAN, por sua vez, atuou como o manejo mais impactado quanto à qualidade do solo, pois manteve todos os índices em condições inferiores aos demais usos. As técnicas utilizadas no manejo desta cultura impactam fortemente sobre as propriedades do solo, pelas práticas de revolvimento do solo, além de consumir grandes quantidades de nutrientes e reduzir a diversidade microbiológica do solo (WIHARSO *et al.*, 2021; MACEDO *et al.*, 2023). Este contexto impacta na diminuição da capacidade da cultura em estocar carbono orgânico, pois leva ao aumento da decomposição pela sua desestabilização (BAILEY *et al.*, 2019; TANTARAWONGSA *et al.*, 2025). A associação dessa cultura com outras, tem demonstrado minimização desses impactos negativos sobre o solo (RAVI *et al.*, 2021).

Em relação as funções ecossistêmicas para cada uso do solo (Figura 7b), o desenvolvimento vegetal foi inferior para o uso MAN, por outro lado, para o suprimento de água e a manutenção da homeostase, a VNP contou com qualidade superior aos demais usos. O suprimento de nutrientes foi superior no uso REV, seguido por EUC e inferior nos usos VNP e MAN. Finalmente, para a atividade biológica, os usos VNP e EUC contaram com índices superiores aos dos usos MAN e REV.

O suprimento de água no solo está relacionado diretamente com a sua agregação, estabilidade, porosidade e permeabilidade, fatores que associados permitem o movimento, drenagem e retenção de água no sistema (JENSEN *et al.*, 2019; LAL, 2020). O uso VNP tem diversos mecanismos que aumentam sua capacidade em suprir água dentro do ecossistema, como por exemplo, pela diversificação biológica, produção intensa de metabólitos e alta capacidade em estocar carbono orgânico, fatores que permitem a melhoria da qualidade física, e, por consequência, da disponibilidade hídrica (ORESCA *et al.*, 2024).

O suprimento de nutrientes no solo possui relação íntima com a adoção de manejos que utilizem princípios de correção da acidez e tamponamento do pH, neutralização de elementos tóxicos, aumento da reatividade dos coloides e na disponibilidade de bases trocáveis (MOREIRA *et al.*, 2023; NIE *et al.*, 2024). O fato dos usos EUC e REV terem apresentado elevada capacidade em suprir nutrientes, isso está vinculado a correções no preparo da área e entrada de resíduos orgânicos, que promovem a ciclagem dos elementos no sistema (MO *et al.*, 2016; FIALHO *et al.*, 2019; ZHU & WU, 2023).

A manutenção elevada da qualidade física e química do solo, condicionam a diversificação da biota, pois essas propriedades atuam como fatores que regulam o desenvolvimento ótimo dos organismos edáficos (SCHLOTTER *et al.*, 2018). Como exemplos desses fatores estão a geração de habitats e o fornecimento de substratos, que atuam moldando a diversidade microbiana (SOUZA *et al.*, 2023). O aumento da atividade biológica do solo nos usos VNP e EUC, denotam essa condição de melhoria da qualidade, resultados já observados em outros estudos e que reforçam o papel desses usos em manterem níveis elevados de qualidade.

Por fim, o uso VNP foi o único de todos que atuou positivamente sobre a manutenção da homeostase do solo, condição específica do estudo no processo de eficiência da microbiota diante do aproveitamento dos recursos ambientais, especialmente com foco no uso da energia e do carbono orgânico (TAO *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2023). Isso decorre da alta demanda metabólica desse uso, está associada à elevada biomassa microbiana e altos teores de diferentes frações do carbono orgânico, fatores que atuam positivamente sobre os quocientes microbianos e mantém o solo em equilíbrio e com elevada qualidade (SILVA *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2022; ASHRAF *et al.*, 2022).

4.4. Conclusão

A área de EUC apresentou maior representatividade para estabilização do estoque do COS, quando comparado com o uso convencional de MAN. A consequência disso tende a gerar um aumento da qualidade do solo, que pode ser observado pela melhoria nas propriedades físicas, químicas e biológicas do

solo, as quais tiveram associação com o uso EUC, com o COS e seus compartimentos. Esse tipo de efeito foi observado na época chuvosa e nas camadas superficiais do solo, como 0-10 e 10-20 cm de profundidade.

A pesquisa também evidenciou o forte papel do uso EUC e da camada de 0-10 cm de profundidade, na manutenção de parte da qualidade e das funções ecossistêmicas do solo, sobretudo aquelas relacionadas com atividade biológica. O EUC e a zona superficial do solo atuam com forte aporte e modificações dos materiais orgânicos, que promovem o desenvolvimento microbiano do solo, induzindo assim na melhoria da sua atividade e diversidade. Esse tipo de efeito atua sobre a função do solo na paisagem, sendo refletido na manutenção do solo como importante filtro ambiental.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, L. L.; et al. Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. **Soil and Tillage Research**, v. 205, n. 104785, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104785>.

ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

ANDRADE, E. M., et al. Land-use effect on soil carbon and nitrogen stock in a seasonally dry tropical forest. **Agronomy (Basel, Switzerland)**, v. 10, n. 2, p. 158, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020158>.

ASHRAF, M. N.; WAQAS, M. A.; RAHMAN, S. Microbial metabolic quotient is a dynamic indicator of soil health: trends, implications and perspectives (review). **Eurasian Soil Science**, v. 55, n. 12, p. 1794-803, 2022. <https://doi.org/10.1134/S1064229322700119>.

BAILEY, V. L.; PRIES, C. H.; LAJTHA, K. What do we know about soil carbon desestabilization? **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 8, p. 083004, 2019.

BAI, X. et al. Extracellular enzyme activity and stoichiometry: the effect of soil microbial element limitation during leaf litter decomposition. **Ecological Indicators**, v. 121, p. 107200, 2021.

BANWART, S. A et al. Soil functions: connecting earth's critical zone. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 47, n. 1, p. 333-359, 2019. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-063016-020544>.

BARBOSA, V. et al. Biomassa, carbono e nitrogênio da serapilheira acumulada de florestas plantadas e nativas. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1-9. 2017.

BLANCO-CANQUI, H. et al. Soil organic carbon: The value to soil properties. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 68, n. 5, p. 129A-134A, 2013. <https://doi.org/10.2489/jswc.68.5.129A>.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic matter changes across a grassland sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 777-783, 1992.

CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; SANTOS, S. A.; CURI, N. Qualidade do solo sob pastagem cultivada e nativa no pantanal sul-mato-grossense. In: "Congresso Brasileira de Ciência do Solo, 32". O solo e a produção de bioenergia: perspectivas e desafios, 5 p., 2009.

CARVALHO, M. L. et al. Stabilization of organic matter in soils: drivers, mechanisms, and analytical tools – a literature review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, p. e0230130, 2023.

CHAER, G. M. Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos. *Dissertação de Mestrado*, Programa de Pós-Graduação em Microbiologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 99 p., 2001.

CHAVARRIA, D. N. et al Response of soil microbial communities to agroecological versus conventional systems of extensive agriculture. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 264, p. 1-8, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.008>.

CHIROL, C.; SÉRÉ, G.; REDON, P. O.; CHENU, C.; DERRIEN, D. Depth dependence of soil organic carbon additional storage capacity in different soil types by the 2050 target for carbon neutrality. **Soil**, v. 11, n. 1, p. 149-174, 2025.

CUNHA, J. R. et al. Soil biological attributes in monoculture and integrated systems in the Cerrado region of Piauí State, Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 43, p. e51814, 2021. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v43i1.51814>.

EBELING, A. G. et al. Substâncias húmicas e relação com atributos edáficos. **Bragantia**, v. 70, p. 157–165, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000100022>.

FARIA, R. F. P. et al. Soil chemical attributes in native and exotic forest cover in source of Batatais State Forest, São Paulo, Brazil. **Brazilian Journal of Animal**

and Environmental Research, v. 5, n. 2, p. 2075-2090, 2020. [10.34188/bjaerv5n2-049](https://doi.org/10.34188/bjaerv5n2-049).

FIALHO, R. C. et al. Fertilization and irrigation affect soil carbon under eucalyptus plantation in the Cerrado. **Floresta e Ambiente**, v. 26, p. e20170679, 2019. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.067917>.

FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil and Tillage Research**, v. 66, n. 2, p. 95-106, 2002. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-063016-020544>.

FUJII, S.; BERG, M. P.; CORNELISSEN, J. H. C. Living litter: dynamic trait spectra predict fauna composition. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 35, n. 10, p. 886-896, 2020.

GATTO, A. et al. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. V. 34, p. 1069-1079. 2010.

GATTO, A. et al. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região centro-leste do estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**. V. 35, n. 4, p. 895-905. 2011.

GIONGO, V. et al. Optimizing multifunctional agroecosystems in irrigated dryland agriculture to restore soil carbon – Experiments and modelling. **The Science of the total environment**, v. 725, n. 138072, p. 138072, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138072>.

GLOVER, J. D.; REGANOLD, J. P.; ANDREWS, P. K. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 80, p. 29-45, 2000.

GOMES, D.S. et al. Cinética de liberação de CO₂ e decomposição da fitomassa em sistemas de uso e manejo do solo. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, e9810111413, 2021a. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i1.11413>.

GOMES, D.S. et al. CO₂ flux e temperatura da superfície edáfica em áreas de caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 4, p. 1898-1908, 2021b. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p1898-1908>.

GUEVARA, M. Soil respiration signals in response to sustainable soil management practices enhance soil organic carbon stocks. arXiv preprint arXiv:2404, p. 05737, 2024.

GUIMARÃES, A. G. C. et al. Variação espaço-temporal de serapilheira em fragmento de Caatinga preservada no semiárido da Paraíba. **Revista Foco**, v. 16, n. 3, p. 1-20, 2023.

HANKE, D.; DICK, D. P. Estoque de carbono e mecanismos de estabilização da matéria orgânica do solo: uma revisão. **Revista Científica Agropampa**, v. 2, n. 2, p. 171-190, 2019.

HAN, Y. et al. Carbon Distribution Characteristics and Sequestration Potential of Various Land-Use Types in a Stony Soil Zone of the Arid Mountainous Regions on the Eastern Tibetan Plateau. **Sustainability**, v. 15, n. 20, p. 14721, 2023. <https://doi.org/10.3390/su152014721>.

HEINRICH, V. H. A. et al. The carbon sink of secondary and degraded humid tropical forests. **Nature**, v. 615, n. 7952, p. 436-442, 2023.

HE, J.; LI, Y.; SHI, X.; HOU, H. Integrating the impacts of vegetation coverage on ecosystem services to determine ecological restoration targets for adaptive management on the Loess Plateau, China. **Land Degradation & Development**, v. 34, p. 5697-5712, 2023.

HLAVANGUANE, A. C. et al. Weathering of anorthosite saprolite: Influence on soil formation in the Borborema province (northeastern Brazil). **Catena**, v. 254, p. 109003, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109003>.

HUSSAIN, M. B. et al. Photodegradation and its effect on plant litter decomposition in terrestrial ecosystems: a systematic review. **Soil Systems**, v. 7, n. 1, p. 6, 2023. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010006>.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Soil quality indicators properties in Mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 55, n. 1, p. 69-78, 2000.

JENSEN, J. L. et al. Relating soil C organic matter fractions to soil structural stability. **Geoderma**, v. 337, p. 834-843, 2019.

KARLEN, D. L. et al. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4-10, 1997.

KARLEN, D. L.; STOTT, D. E. A framework for evaluating physics and chemical indicators of soil quality. In: "Defining soil quality for a sustainable environment". **American Society of Agronomy**, p. 53-71, 1994.

KRISHNA, M. P.; MOHAN, M. Litter decomposition in forest ecosystems: a review. **Energy, Ecology and Environment**, v. 2, p. 236-249, 2017.

LAL, R. Soil organic matter and water retention. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 5, p. 3265-3277, 2020.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 261-273, 2020.

LEHMANN, J. et al. Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. **Nature Geoscience**, v. 13, n. 8, p. 529-534, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0612-3>.

LIMA, J.R.D.S. et al. Impacts of land-use changes on soil respiration in the semi-arid region of Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, p. e0200092, 2020. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200092>.

LORENZ, K.; LAL, R. Soil carbon stock. In: "Carbon sequestration in agricultural ecosystems". **Springer**, p. 39-136, 2018.

MACEDO, R. S. et al. Effects of degradation on soil attributes under Caatinga in the Brazilian semiarid. **Revista Árvore**, v. 47, p. e4702, 2023. <https://doi.org/10.1590/1806-9088202300000002>.

MARION, L. F. et al. Development of a soil quality index to evaluate agricultural cropping systems in southern Brazil. **Soil & LSF Research**, v. 218, p. 105293, 2022.

MENDES, K. R.; et al. Seasonal variation in net ecosystem CO₂ exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 9454, 2020.

MENEZES, R. S. C. et al. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. **Geoderma**, v. 390, p. 114943, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114943>.

MO, Q. et al. Reforestation in southern China: revisiting soil N mineralization and nitrification after 8 years restoration. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 19770, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep19770>.

MOREIRA, W. K. O. et al. Methods to recommend corrective measures for agricultural soils: a systematic literature study. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 54, n. 8, p. 1102-1133, 2023. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2137194>.

MOURA, P. M.; ALTHOFF, T. D.; OLIVEIRA, R. A.; SOUTO, J. S.; SOUTO, P. C.; MENEZES, R. S.; SAMPAIO, E. V. Carbon and nutrient fluxes through litterfall at four succession stages of Caatinga dry forest in Northeastern Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 105, n. 1, p. 25-38, 2016.

MURPHY, B. W. Impact of soil organic matter on soil properties—a review with emphasis on Australian soils. **Soil Research**, v. 53, n. 6, p. 605-635, 2015.

NIE, X. et al. Advances in Soil Amendments for Remediation of Heavy Metal-Contaminated Soils: Mechanisms, Impact, and Future Prospects. **Toxics**, v. 12, n. 12, p. 872, 2024. [10.3390/toxics12120872](https://doi.org/10.3390/toxics12120872).

OLIVEIRA, A. M. et al. Decomposição da serapilheira foliar em plantios de bambu, nim indiano e eucalipto. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 3, p. 845-855. 2020.

OLIVEIRA, F. C.; FERREIRA, G. W.; ASSUNÇÃO, S. J.; PEDROTTI, A. Long-term Impacts of Tillage and Cover Cropping on Soil Organic Carbon and Carbon Oxidizable Fractions in a Tropical Sandy Soil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 24, n. 4, p. 7640-7650, 2024.

OLIVEIRA, W. R. D. et al. Dinâmica dos atributos microbiológicos do solo sob sistemas integrados de produção, pastagem contínua e cerrado nativo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1501-1510, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900049>.

ORESCA, D. et al. Impact of Conversion of the Caatinga Forest to Different Land Uses on Soil and Root Respiration Dynamics in the Brazilian Semiarid Region. **Sustainability**, v. 16, n. 23, 10652, 2024. <https://doi.org/10.3390/su162310652>.

PAGE, K. L.; DANG, Y. P.; DALAL, R. C. The ability of conservation agriculture to conserve soil organic carbon and the subsequent impact on soil physical, chemical, and biological properties and yield. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 31, 2020.

PALLANDT, M.; SCHRUMPF, M.; LANGE, H.; REICHSTEIN, M.; YU, L.; AHRENS, B. Modelling the effect of climate–substrate interactions on soil organic matter decomposition with the Jena Soil Model. **Biogeosciences**, v. 22, n. 7, p. 1907-1928. 2025.

PENG, J. et al. Shift in soil bacterial communities from k- to r-strategists facilitates adaptation to grassland degradation. **Land Degradation & Development**, v. 33, n. 12, p. 2076-2091, 2022.

PESSÔA, G. C. M.; et al. Carbon and nitrogen stocks and microbiological activity under forest-pasture system and traditional pasture in Pernambuco. **Floresta e Ambiente**, v. 29, p. e20210068, 2022.

PRESCOTT, C. E.; VESTERDAL, L. Decomposition and transformations along the continuum from litter to soil organic matter in forest soils. **Forest Ecology and Management**, v. 498, p. 119522, 2021.

RAIESI, F.; BEHESHTI, A. evaluating forest soil quality after deforestation and loss of ecosystem services using network analysis and factor analysis techniques. **Catena**, v. 208, p. 105778, 2022.

RAVI, V. et al. Advances in cassava-based multiple-cropping systems. **Horticultural Reviews**, v. 48, p. 153-232, 2021. <https://doi.org/10.1002/9781119750802.ch3>.

REZENDE, S. J. et al. Impact of deforestation on the soil physical and chemical attributes, and humic fraction of organic matter in dry environments in Brazil. **iForest- Biogeosciences and Forestry**, v. 6, pág. 465, 2022. <https://doi.org/10.3832/ifor4016-015>.

RODRÍGUEZ, B. C. et al. Conservation agriculture as a sustainable system for soil health: a review. **Soil Systems**. V. 6, n. 4, p. 87, 2022. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040087>.

ROULIA, M. Humic substances: Importance for agriculture, affinity and interactions with soil amendments and pollutants. **Agronomy**, v. 14, n. 2, p. 382, 2024. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020382>.

SANTIAGO, F. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; PINHEIRO, M. R. A. Índice de qualidade do solo em cultivo agroecológico e convencional no semiárido potiguar, Brasil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 13, n. 1, p. 97-105, 2018.

SANTOS, J. C. B. et al. Saprolithology applied to pedology: Integrated study of soil and saprolite derived from crystalline rocks to better understand properties of whole regoliths along a climate gradient (NE Brazil). **Geoderma**, v. 409, p. 115602, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115602>.

SANTOS, W. B. dos et al. Vegetação lenhosa de regiões semiáridas em diferentes altitudes. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 161-175, 2020. <https://doi.org/10.5902/1980509836803>.

SCHLOTTER, M. et al. Microbial indicators for soil quality. **Biology and Fertility of Soils**, v. 54, p. 1-10, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1248-3>.

SEMENOV, V. M. et al. Humification and nonhumification pathways of the organic matter stabilization in soil: A review. **Eurasian Soil Science**, v. 46, p. 355-368, 2013. <https://doi.org/10.1134/S106422931304011X>.

SENA, K. N. et al. Post-harvest eucalyptus residue removal reduces soil aggregation and biological activities in Central-West Brazil. **Sustainability**, v. 15, n. 11, p. 8790, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15118790>.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete sample). *Biometrika*, **Great Britain**, v. 52, n. 3, p. 591-611, 1965. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>.

SHEN, X. et al. Dynamics of soil organic carbon and labile carbon fractions in soil aggregates affected by different tillage managements. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1541, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13031541>.

SILVA, M. O. et al. Qualidade do solo: indicadores biológicos para manejo sustentável. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 6853-6875, 2021.

SILVA, P. F.; SOUSA LIMA, J. R.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, R.; SOUZA, E. S.; SILVA, J. R. I.; ALVES, E. M. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 147, p. 71-82, 2017.

SILVA, W. S. et al. The Stabilization Method of Sewage Sludge effects soil microbial attributes and boosts soil P content and maize yield in a sludge-amended soil in the field. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 1267-1276, 2022.

SOUZA, T. A. F. et al. Impact of ecological stages on the soil microbiota and soil abiotic factors in tropical and subtropical Brazilian regions. **Archives of Microbiology**, v. 205, n. 10, p. 335, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03677-8>.

STAFF, S. S. Kellogg soil survey laboratory methods manual. **Soil Surv. Investig. Rep**, v. 42, n. 5, 2014.

STAVI, I.; BEL, G.; ZAADY, E. Soil functions and ecosystem services in conventional, conservation, and integrated agricultural systems. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, p. 1-12, 2016.

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

SWIFT, R. S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D. L., ed. Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. **Soil Science Society America Journal**, Book Series: 5, p 1018-1020, 1996.

TAHMOURES, M. et al. Soil carbon prediction under different land uses by integration of remote sensing and machine learning algorithms in a semi-arid watershed, Iran. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 16, n. 1, p. 83, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11188-5>.

TANTARAWONGSA, P. et al. Effect of long-term maize and cassava cropping management on soil organic carbon sequestration in different soil aggregate fractions. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 71, n. 3, p. 257-268, 2025. <https://doi.org/10.1080/00380768.2024.2443164>.

TAO, F. et al. Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage. **Nature**, v. 618, n. 7967, p. 981-985, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06042-3>.

TOMAR, U.; BAISHYA, R. Moisture regime influence on soil carbon stock and carbon sequestration rates in semi-arid forests of the National Capital Region, India. **Journal of forestry research**, v. 31, n. 6, p. 2323–2332, 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/s11676-019-01032-6>.

TOMAZ, A. R.; OLIVEIRA FERREIRA, A.; LAL, R.; AMADO, T. J. C.; SILVA, B. O. T.; SILVA, W. R.; FRACETTO, F. J. C.; INAGAKI, T. M.; FREIRE, M. B. G. S.; NUNES, E. O. D. S. Can natural undisturbed revegetation restores soil organic carbon to levels under native climax vegetation under tropical semiarid climate? **Land Degradation & Development**, v.35, n. 5, p. 1971-1981, 2024.

WANG, C.; KUZUYAKOV, Y. Energy use efficiency of soil microorganisms: Driven by carbon recycling and reduction. **Global Change Biology**, v. 29, n. 22, p. 6170-6187, 2023. <https://doi.org/10.1111/gcb.16925>.

WANG, L. et al. Litter diversity accelerates labile carbon but slows recalcitrant carbon decomposition. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 168, p. 108632, 2022.

WIESMEIER, M. et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils – a review of drivers and indicators at various scales. **Geoderma**, v. 333, p. 149-162, 2019.

WIHARSO, D. et al. Effect of long-term cassava cultivation on the morphology and properties of soils in Lampung, Southern Sumatra, Indonesia. **Geomate journal**, v. 20, n. 79, p. 168-176, 2021. <https://doi.org/10.21660/2021.79.j2053>.

XUE, Y.; et al. Effects of Management Practices on Soil Microbial Diversity and Structure on Eucalyptus Plantations. **Land**, v. 14, n. 4, p. 692, 2025. <https://doi.org/10.3390/land14040692>.

YANG, X. et al. Q. Solubility characteristics of soil humic substances as a function of pH: mechanisms and biogeochemical perspectives. **Biogeosciences**, v. 22, n. 7, p. 1745-1765, 2025. <https://doi.org/10.5194/bg-22-1745-2025>.

ZARAFSHAR, M. et al. Do tree plantations or cultivated fields have the same ability to maintain soil quality as natural forests? **Applied Soil Ecology**, v. 151, p. 103536, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103536>.

ZHANG, K.; MALTAIS-LANDRY, G.; LIAO, H. L. How soil biota regulate C cycling and soil C pools in diversified crop rotations. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 156, p. 108219, 2021.

ZHOU, J.; LIU, Y.; LIU, C.; ZAMANIAN, K.; FENG, W.; STEINER, S.; SHI, L.; GUILLAUME, T.; KUMAR, A. Necromass responses to warming: A faster microbial turnover in favor of soil carbon stabilisation. **Science of The Total Environment**, v. 954, p. 176651, 2024.

ZHU, Z.; WU, L. Fertilization and residue management improved soil quality of eucalyptus plantations. **Forests**, v. 14, n. 8, p. 1570, 2023. <https://doi.org/10.3390/f14081570>.

5. CONCLUSÃO GERAL

No geral, os resultados evidenciam que a mudança no uso do solo exerce influência significativa sobre suas propriedades físicas, químicas e biológicas. A área sob vegetação nativa preservada apresentou melhor estrutura física, com maior grau de flocculação e menor densidade, porém com baixos níveis de fertilidade.

Em contrapartida, áreas sob plantio de eucalipto (EUC) mostraram maior associação com atributos químicos e biológicos do solo, bem como maior teor de matéria orgânica, destacando-se pela capacidade de estabilizar estoques de carbono orgânico e melhorar a qualidade do solo, especialmente nas camadas superficiais e no período chuvoso.

Esses efeitos positivos incluem incremento na atividade microbiana e na funcionalidade ecossistêmica, indicando que, embora a intervenção antrópica modifique o ambiente, o uso de eucalipto pode contribuir para a manutenção de condições favoráveis ao solo e para a sua sustentabilidade, quando comparado a usos mais degradantes, como áreas em processo de manejo convencional.

ANEXO A. Análise da variância das propriedades físicas do solo sob diferentes sistemas de uso do solo, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade, no município de Araripina (PE)

Propriedade	Fonte de variação			² CV (%)
	Uso do solo	Profundidade	¹ U x P	
Areia total	20,88*	4,27*	0,60 ^{ns}	3,16
Areia grossa	4,75*	5,99*	0,76 ^{ns}	5,37
Areia fina	6,66*	2,78 ^{ns}	0,71 ^{ns}	16,51
Silte	1,33 ^{ns}	1,11 ^{ns}	0,61 ^{ns}	54,67
Argila total	21,83*	1,26 ^{ns}	0,50 ^{ns}	12,98
Argila dispersa em água	18,75*	3,57*	0,46 ^{ns}	19,52
Grau de floculação	5,29*	3,74*	0,70 ^{ns}	21,42
Densidade de partículas	2,42 ^{ns}	1,15 ^{ns}	0,93 ^{ns}	2,49
Densidade do solo	4,08*	18,80*	1,25 ^{ns}	6,79
Porosidade total	2,55 ^{ns}	29,31*	1,23 ^{ns}	9,47
Macroporosidade	4,07*	43,64*	1,36 ^{ns}	23,67
Microporosidade	53,93*	14,90*	1,50 ^{ns}	8,75

¹Interação entre U (uso do solo) x P (profundidade de coleta) e ²coeficiente de variação. ns= não significativo, *Significativo a 5% de probabilidade

ANEXO B. Análise da variância das propriedades químicas do solo nas camadas de coleta de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade sob diferentes sistemas de uso do solo em dois períodos de amostragem, no município de Araripina (PE)

Prof. (cm)	¹ FV	² pH	³ Ca ²⁺	⁴ Mg ²⁺	⁵ K ⁺	⁶ Na ⁺	⁷ SB	⁸ Al ³⁺	⁹ H+Al	¹⁰ t	¹¹ T	¹² V	¹³ m	¹⁴ PST	¹⁵ P
0-10	Período	1,40 ^{ns}	1,10 ^{ns}	22,33*	3,82 ^{ns}	4,10 ^{ns}	3,94 ^{ns}	0,72 ^{ns}	2,76 ^{ns}	4,09*	2,08 ^{ns}	6,25*	3,54 ^{ns}	0,98 ^{ns}	1,29 ^{ns}
	Uso	83,42*	19,52*	39,11*	0,68 ^{ns}	19,89*	22,14*	48,78*	74,60*	19,89*	21,78*	59,23*	35,17 _*	12,56*	3,69*
	¹⁶ P x U	2,54 ^{ns}	2,59 ^{ns}	1,97 ^{ns}	0,59 ^{ns}	5,22*	2,54 ^{ns}	0,78 ^{ns}	0,85 ^{ns}	2,84 ^{ns}	1,99 ^{ns}	1,85 ^{ns}	1,55 ^{ns}	4,63*	0,55 ^{ns}
	¹⁷ CV (%)	5,77	45,26	39,30	51,21	90,86	41,56	33,52	14,66	35,60	20,93	19,02	52,84	91,49	33,07
10-20	Período	0,23 ^{ns}	0,01 ^{ns}	6,41*	1,45 ^{ns}	19,80*	1,24 ^{ns}	0,46 ^{ns}	7,09*	1,28 ^{ns}	0,03 ^{ns}	4,15*	3,58 ^{ns}	16,50*	0,05 ^{ns}
	Uso	50,42*	15,26*	21,24*	1,90 ^{ns}	15,04*	18,83*	32,33*	51,69*	15,14*	7,21*	46,67*	41,08 _*	10,76*	1,75 ^{ns}
	P x U	0,40 ^{ns}	0,58 ^{ns}	0,60 ^{ns}	1,88 ^{ns}	5,59*	0,46 ^{ns}	0,04 ^{ns}	1,95 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,91 ^{ns}	0,52 ^{ns}	5,64*	1,45 ^{ns}
	CV (%)	6,64	51,24	61,39	54,52	97,09	47,85	32,82	13,48	33,92	18,22	28,18	39,86	98,68	38,88
20-40	Período	7,60*	3,08 ^{ns}	24,31*	0,63 ^{ns}	0,05 ^{ns}	10,05*	1,83 ^{ns}	0,85 ^{ns}	11,46*	5,44*	12,76*	13,01 _*	0,07 ^{ns}	0,36 ^{ns}
	Uso	41,03*	10,69*	20,47*	3,69*	0,98 ^{ns}	11,54*	19,87*	29,49*	9,81*	11,10*	22,72*	22,04 _*	0,98 ^{ns}	4,53*
	P x U	0,11 ^{ns}	1,64 ^{ns}	1,99 ^{ns}	0,19 ^{ns}	1,63 ^{ns}	1,50 ^{ns}	0,34 ^{ns}	1,19 ^{ns}	2,58 ^{ns}	2,45 ^{ns}	0,67 ^{ns}	1,10 ^{ns}	1,72 ^{ns}	2,65 ^{ns}
	CV (%)	5,03	46,57	54,67	78,89	239,85	47,51	27,13	11,81	25,91	13,96	32,77	33,43	213,27	49,74
40-60	Período	2,83 ^{ns}	1,06 ^{ns}	6,06*	0,63 ^{ns}	0,79 ^{ns}	0,31 ^{ns}	1,58 ^{ns}	19,64*	0,02 ^{ns}	7,82*	2,97 ^{ns}	2,81 ^{ns}	0,65 ^{ns}	6,06*
	Uso	20,04*	3,92*	19,81*	1,78 ^{ns}	2,51 ^{ns}	4,11*	7,56*	10,67*	6,18*	4,88*	5,81*	3,91*	3,48*	1,38 ^{ns}
	P x U	1,10 ^{ns}	6,45*	3,54*	0,42 ^{ns}	0,70 ^{ns}	3,81*	1,23 ^{ns}	0,60 ^{ns}	3,36*	1,96 ^{ns}	3,36*	3,08 ^{ns}	0,58 ^{ns}	0,07 ^{ns}
	CV (%)	3,37	32,81	46,95	97,34	224,48	37,91	17,60	9,94	18,51	10,46	32,77	28,02	188,48	75,82

¹Fonte de variação, ²potencial hidrogeniônico, ³teor de cálcio trocável, ⁴teor de magnésio trocável, ⁵teor de potássio trocável, ⁶teor de sódio trocável, ⁷soma de bases, ⁸teor de alumínio trocável, ⁹acidez potencial, ¹⁰capacidade de troca de cátions efetiva, ¹¹capacidade de troca de cátions potencial, ¹²saturação por bases, ¹³saturação por alumínio, ¹⁴porcentagem de sódio trocável, ¹⁵fósforo disponível, ¹⁶interação entre período x uso do solo e ¹⁷coeficiente de variação.

ANEXO C Análise da variância das propriedades biológicas do solo nas camadas de coleta de 0-10 e 10-20 cm de profundidade sob diferentes sistemas de uso do solo em dois períodos de amostragem, no município de Araripina (PE)

Prof. (cm)	¹ FV	² CBM	³ RB	⁴ BGC	⁵ q-CO ₂	⁶ q-mic	⁷ q-min
0-10	Período	11,04*	8,80*	0,80 ^{ns}	2,27 ^{ns}	0,71 ^{ns}	13,58*
	Uso	6,15*	0,35 ^{ns}	6,97*	0,87 ^{ns}	2,49 ^{ns}	3,54*
	⁸ P x U	8,71*	3,33*	2,76 ^{ns}	2,62 ^{ns}	3,30*	1,59 ^{ns}
	⁹ CV (%)	41,96	22,48	32,27	111,60	108,56	50,22
10-20	Período	0,05 ^{ns}	1,64 ^{ns}	0,43 ^{ns}	1,08 ^{ns}	5,84*	10,03*
	Uso	0,62 ^{ns}	0,49 ^{ns}	6,21*	0,97 ^{ns}	1,76 ^{ns}	1,35 ^{ns}
	P x U	2,84 ^{ns}	1,53 ^{ns}	2,94 ^{ns}	2,20 ^{ns}	2,67 ^{ns}	2,82 ^{ns}
	CV (%)	44,37	23,84	37,96	42,01	54,06	50,10

¹Fonte de variação, ²carbono da biomassa microbiana, ³respiração basal, ⁴atividade da beta-glicosidase, ⁵quociente metabólico, ⁶quociente microbiano, ⁷quociente de mineralização, ⁸interação período x uso do solo e ⁹coeficiente de variação.

ANEXO D. Peso das variáveis utilizadas nos índices de qualidade do solo

Função Eossistêmica	Peso	Indicador			
		Nível I	Peso	Nível II	Peso
1. Desenvolvimento vegetal	0,20	¹ MO	0,25		
		² Ds	0,25		
		Acidez	0,25	³ pH	0,33
				⁴ H+Al	0,33
				⁵ Al ³⁺	0,33
		Nutrientes	0,25	⁶ P	0,25
				⁷ K ⁺	0,25
				⁸ Ca ²⁺	0,25
				⁹ Mg ²⁺	0,25
2. Suprimento de água	0,20	MO	0,500		
		Ds	0,125		
		¹⁰ GF	0,125		
		Permeabilidade	0,250	¹¹ PT	0,33
				¹² Ma	0,33
				¹³ Mi	0,33
3. Suprimento de nutrientes	0,20	MO	0,20		
		¹⁴ T	0,20		
		¹⁵ V	0,20		
		¹⁶ m	0,20		
		Atividade Biológica	0,20	¹⁷ CBM	0,50
				¹⁸ BGC	0,50
4. Atividade biológica	0,20	MO	0,20		
		CBM	0,20		
		BGC	0,20		
		¹⁹ RB	0,20		
		Nutrientes	0,20	Ca ²⁺	0,25
				Mg ²⁺	0,25
				K ⁺	0,25
				P	0,25
5. Manutenção da homeostase	0,20	²⁰ q-CO ₂	0,20		
		²¹ q-mic	0,20		
		²² q-min	0,20		
		Microbiota	0,40	CBM	0,50
				BGC	0,50

¹matéria orgânica, ²densidade do solo, ³potencial hidrogeniônica, ⁴acidez potencial, ⁵alumínio trocável, ⁶fósforo disponível, ⁷potássio trocável, ⁸cálcio trocável, ⁹magnésio trocável, ¹⁰grau de floculação, ¹¹porosidade total, ¹²macroporosidade, ¹³microporosidade, ¹⁴capacidade de troca catiônica, ¹⁵saturação por bases, ¹⁶saturação por alumínio, ¹⁷carbono da biomassa microbiana, ¹⁸atividade da beta-glicosidase, ¹⁹respiração basal, ²⁰quociente metabólico, ²¹quociente microbiano e ²²quociente de mineralização.

ANEXO E. Valores de função de pontuação e referências para avaliação da qualidade do solo

Tipo de curva	Indicador	LI ¹	LS ²	LBI ³	LBS ⁴	OTI ⁵	Fonte
Propriedade biológica							
Mais é melhor	Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	0	18,4	9,2			Cardoso et al. (2009)
Mais é melhor	Carbono da biomassa microbiana (kg ha ⁻¹)	0	375	188			Glover; Reganold; Andrews (2000)
Mais é melhor	Respiração basal (mg kg ⁻¹ day ⁻¹)	6	60	33			Marion et al. (2022)
Mais é melhor	Atividade da β -glicosidase (μ g g ⁻¹ h ⁻¹)	0	70	35			Chaer (2001)
Menos é melhor	Quociente metabólico (mg mg ⁻¹ dia ⁻¹)	0	3	1,50			Chaer (2001)
Mais é melhor	Quociente microbiano (%)	0	3,10	1,55			Chaer (2001)
Mais é melhor	Quociente de mineralização (% dia ⁻¹)	0	3,10	1,55			Chaer (2001)
Propriedade física							
Menos é melhor	Densidade do solo (g cm ⁻³)	0,85	2	1,50			Chaer (2001)
Ótimo	Porosidade total (%)	20	80	40	60	50	Glover; Reganold; Andrews (2000)
Mais é melhor	Macroporosidade (%)	0	15	7			Marion et al. (2022)
Mais é melhor	Microporosidade (%)	0	35	20			Marion et al. (2022)
Mais é melhor	Grau de flocculação (%)	0	100	50			Santiago; Montenegro; Pinheiro (2018)
Propriedade química							
Ótimo	pH (1:2,5)	3	8	3,30	7	5	Glover; Reganold; Andrews (2000)
Menos é melhor	Acidez potencial (cmol _c kg ⁻¹)	0	9	4,50			Chaer (2001)
Mais é melhor	Capacidade de troca de cátions (cmol _c kg ⁻¹)	0	21	10,50			Glover; Reganold; Andrews (2000)
Mais é melhor	Saturação de bases (%)	0	85	45			Marion et al. (2022)
Menos é melhor	Saturação de alumínio (%)	0	100	50			Chaer (2001)
Mais é melhor	Fósforo disponível (mg kg ⁻¹)	0	36	18			Marion et al. (2022)
Mais é melhor	Cálcio trocável (cmol _c kg ⁻¹)	0	5	2			Marion et al. (2022)
Mais é melhor	Magnésio trocável (cmol _c kg ⁻¹)	0	1	0,50			Marion et al. (2022)
Mais é melhor	Potássio trocável (cmol _c kg ⁻¹)	0	0,15	0,08			Chaer (2001)
Menos é melhor	Alumínio trocável (cmol _c kg ⁻¹)	0	2	1			Chaer (2001)

¹Limite inferior, ²limite superior, ³linha-base inferior, ⁴linha-base superior e ⁵valor ótimo.