



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE SERRA TALHADA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

JASIEL LUCAS ALVES DE OLIVEIRA

**BIOMASSA MICROBIANA E ESTOQUES DE NITROGÊNIO E DE CARBONO
EM SISTEMA AGROFLORESTAL COMPOSTO POR SABIÁ E PALMA
FORRAGEIRA EM AMBIENTE SEMIÁRIDO**

Serra Talhada – PE

2026

JASIEL LUCAS ALVES DE OLIVEIRA

**BIOMASSA MICROBIANA E ESTOQUES DE NITROGÊNIO E DE CARBONO
EM SISTEMA AGROFLORESTAL COMPOSTO POR SABIÁ E PALMA
FORRAGEIRA EM AMBIENTE SEMIÁRIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal Rural de Pernambuco na Unidade Acadêmica de Serra Talhada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Produção Vegetal.

Orientadora: Profa. Dra. Carolina Etienne de Rosália e Silva Santos
Coorientadores: Profa. Dra. Ana Dolores Santiago de Freitas / Prof. Dr. Maurício Luiz de Mello Vieira Leite

Serra Talhada – PE

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação Sistema
Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário: Danilo Trindade Barbosa – CRB – 4 2285

- O49b Oliveira, Jasiel Lucas Alves de.
Biomassa microbiana e estoques de nitrogênio e de carbono em sistema agroflorestal composto por sabiá e palma forrageira em ambiente semiárido / Jasiel Lucas Alves de Oliveira. – Serra Talhada, 2026.
47 f. il.
- Orientador (a): Carolina Etienne de Rosália e Silva Santos.
Coorientador(a): Maurício Luiz de Mello Vieira Leite.
Coorientador(a): Ana Dolores Santiago de Freitas.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica Serra Talhada - UAST, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Serra Talhada, PE- BR, 2026.
- Inclui referências.
1. Sistema Agroflorestal. 2. Leguminosa. 3. *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. 4. *Opuntia stricta* (Haw) Haw. I. Santos, Carolina Etienne de Rosália e Silva, orient. II. Leite, Maurício Luiz de Mello Vieira, coorient. III. Freitas, Ana Dolores Santiago de, coorient. IV. Título.

CDD 631.4

JASIEL LUCAS ALVES DE OLIVEIRA

**BIOMASSA MICROBIANA E ESTOQUES DE NITROGÊNIO E DE CARBONO
EM SISTEMA AGROFLORESTAL COMPOSTO POR SABIÁ E PALMA
FORRAGEIRA EM AMBIENTE SEMIÁRIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal Rural de Pernambuco na Unidade Acadêmica de Serra Talhada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Produção Vegetal.

Aprovado (a) em: 26 / 02 / 2026.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Carolina Etienne de Rosália e Silva Santos (Orientadora)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Cleber Pereira Alves (Examinador Interno)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dra. Edilândia Farias Dantas (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

*Dedico a todos que contribuíram de
alguma forma para a realização deste
sonho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

Primeiramente a Deus, por permitir passar por todas as dificuldades, barreiras e provas, para que eu pudesse ter como aprendizado e me manter sempre forte para os desafios futuros.

A minha esposa Andreia Magnólia Marques Nunes, por me apoiar em tudo, sempre me incentivando, suportando os meus estresses e nervosismos, acreditando sempre no meu potencial. Por todas as dificuldades que passamos juntos e mesmo assim continuamos firmes e fortes e vamos mais além, te amo.

Ao meu filho Abel Lucas Nunes de Oliveira, que ainda está por vir, mas já é a razão do meu viver e minha felicidade.

Aos meus pais Maria Lucicleide de Oliveira Alves e João Alves dos Santos por serem meu exemplo de força e resiliência, que mesmo de longe estão sempre me apoiando e fazendo o possível para que eu pudesse dar um passo a mais e ser um vencedor.

A toda a minha família que de forma direta ou indireta contribuíram para que eu possa conseguir chegar até aqui.

A todos os meus amigos de desde a graduação e os que eu fiz durante esse período de mestrado que são pra toda a vida. Alefe, Ericks, Emmanuel, Ivanice, Marcelo, Mayara, Thiago, Wagner e todos os outros que não citei, mas sabem que de alguma forma me ajudaram de diversas maneiras e me fortaleceram, pelo apoio demonstrado e por toda ajuda quando precisei.

A minha orientadora profa. Dra. Carolina Etienne de Rosália e Silva Santos e coorientadores profa. Dra. Ana Dolores Santiago de Freitas e prof. Dr. Maurício Luiz de Mello Vieira Leite, por todos os ensinamentos, incentivos e paciência durante toda a minha trajetória como mestrando. Pela oportunidade a mim atribuída para que eu pudesse desenvolver a minha pesquisa da melhor maneira possível, me permitindo obter o melhor desempenho possível no meu processo de formação profissional.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco / Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UAST) por proporcionar ensino de qualidade e laboratórios com os melhores equipamentos para realização de pesquisa de excelência.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por proporcionar a obtenção de bolsa de estudo, importantíssima durante todo o período de mestrado, pois sem ela seria complicado a minha obtenção do título de mestre.

E a todos que de forma direta ou indireta, contribuíram nessa caminhada até a conclusão do mestrado, sou muito grato a todos.

Muito obrigado!

“Não espere o futuro mudar tua vida,
porque o futuro será a consequência do
presente”

(Racionais, 2002).

RESUMO GERAL

O uso inadequado dos recursos naturais é um dos principais fatores do aumento na degradação do solo e aumento nas concentrações de gases do efeito estufa, problemas que ameaçam a segurança alimentar e qualidade de vida da população mundial. Com isso, têm sido estudados métodos mais conservacionistas e sustentáveis na produção agrícola e pecuária, como a utilização de sistemas agroflorestais (SAF). Neste sentido, objetivou-se nesta pesquisa avaliar a biomassa microbiana e os estoques de carbono e nitrogênio em um sistema agroflorestal composto por sabiá e palma forrageira em ambiente semiárido. O ensaio experimental foi conduzido entre abril de 2024 a setembro de 2025 na Universidade Federal Rural de Pernambuco na Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UAST), em delineamento em blocos casualizado, com 5 blocos, sob esquema de parcelas subdivididas 3 x 2, sendo as parcelas compostas por três sistemas de cultivo (monocultivo de palma e de sabiá e sistema agroflorestal combinando ambas espécies) e as subparcelas dois diferentes períodos de avaliação (12 e 18 meses após implantação dos sistemas). Realizou-se avaliações de amostras de solo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidades. A partir destas, determinou-se as concentrações e estoques de N e C, densidade do solo, respiração basal do solo (RBS), carbono da biomassa microbiana (Cmic), quociente metabólico (qCO₂) e quociente microbiano (qMIC). De posse dos resultados, verificou-se diferença significativa nos períodos avaliados para os estoques de N e C e concentração de C na camada de 20-40 cm, com maiores médias para o período de 18 meses, com 0,47 e 43,38 Mg ha⁻¹ e, 14,03 g kg⁻¹, respectivamente. Com relação aos parâmetros microbiológicos, o sistema afetou apenas o qCO₂ na camada de 20-40 cm, com maior média obtida no SAF, porém, igual ao monocultivo de palma. Por sua vez, o período de avaliação afetou o Cmic e qMIC independentemente da camada de solo, e o qCO₂ em 20-40 cm. Os resultados obtidos neste estudo indicam que os sistemas não causaram perturbação ao solo (qMIC e qCO₂) e que a inclusão de sabiá pode ter levado a aumentos na concentração de C e estoques de N e C na camada subsuperficial do solo, após 1,5 anos do plantio. Contudo, estudos adicionais tornam-se necessários, pois é importante monitorar possíveis impactos a longo prazo.

Palavras-chave: agrofloresta; leguminosa; *Mimosa caesalpinifolia* Benth.; *Opuntia stricta* (Haw) Haw.

GENERAL ABSTRACT

The inappropriate use of natural resources is one of the main factors contributing to increased soil degradation and rising greenhouse gas concentrations, problems that threaten food security and the quality of life of the world's population. Therefore, more conservationist and sustainable methods in agricultural and livestock production, such as the use of agroforestry systems (AFS), have been studied. In this sense, this research aimed to evaluate microbial biomass and carbon and nitrogen stocks in an agroforestry system composed of sabiá and forage cactus in a semiarid environment. The experimental trial was conducted between april 2024 and september 2025 at the Federal Rural University of Pernambuco, Serra Talhada Academic Unit (UFRPE/UAST), in a randomized block design with 5 blocks, under a 3 x 2 split-plot scheme. The main plots consisted of three cropping systems (monoculture of cactus and sabiá, and an agroforestry system combining both species), and the subplots consisted of two different evaluation periods (12 and 18 months after system implementation). Soil samples were evaluated at depths of 0-20 and 20-40 cm. From these, the concentrations and stocks of N and C, soil density, basal soil respiration (BSR), microbial biomass carbon (C_{mic}), metabolic quotient (qCO₂), and microbial quotient (qMIC) were determined. Based on the results, a significant difference was observed in the evaluated periods for N and C stocks and C concentration in the 20-40 cm layer, with higher averages for the 18-month period, with 43.38 Mg ha⁻¹, and 14.03 g kg⁻¹, respectively. Regarding microbiological parameters, the system only affected qCO₂ in the 20-40 cm layer, with the highest average obtained in the agroforestry system, but equal to the palm monoculture. In turn, the evaluation period affected C_{mic} and qMIC independently of the soil layer, and qCO₂ in the 20-40 cm layer. The results obtained in this study indicate that the systems did not cause soil disturbance (qMIC and qCO₂) and that the inclusion of sabiá may have led to increases in C concentration and N and C stocks in the subsurface soil layer after 1.5 years of planting. However, further studies are necessary, as it is important to monitor possible long-term impacts.

Keywords: agroforestry; legume; *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.; *Opuntia stricta* (Haw) Haw.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura 1	Mapa de localização da área experimental.....	35
Figura 2	Chuva (mm), radiação (MJ m^{-2}), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade (%), de abril de 2024 a setembro de 2025 em Serra Talhada, Pernambuco, Brasil.....	36
Figura 3	Análise de componentes principais (PCA) dos diferentes sistemas de cultivo (Consórcio, monocultivo de palma e monocultivo de sabiá) avaliados após 12 e 18 meses de implantação, na profundidade de 0-20cm e 20-40cm, entre os parâmetros carbono da biomassa microbiana (C_{mic}), quociente microbiano (qMIC), respiração basal do solo (RBS), quociente metabólico (qCO_2), densidade do solo, concentrações e estoques de N e C.....	40

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 1	Atributos físicos e químicos do solo da área experimental. Serra Talhada, PE.....	35
Tabela 2	Respiração basal do solo (RBS), carbono da biomassa microbiana (Cmic), quociente microbiano (qMIC) e quociente metabólico (qCO ₂) em área com diferentes sistemas de cultivo e períodos de avaliação.....	38
Tabela 3	Densidade do solo (Ds), concentrações e estoques de nitrogênio (N) e carbono (C) em áreas de diferentes sistemas de cultivo.....	39
Tabela 4	Densidade do solo (Ds), concentrações e estoques de nitrogênio (N) e carbono (C) em áreas de diferentes sistemas de cultivo, com avaliação em dois períodos.....	39

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – SISTEMA AGROFLORESTAL COMPOSTO POR SABIÁ E PALMA FORRAGEIRA EM AMBIENTE SEMIÁRIDO: UMA REVISÃO.....	13
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. SISTEMA AGROFLORESTAL.....	17
3. SABIÁ (<i>Mimosa caesalpinifolia</i> Benth.)	18
4. PALMA FORRAGEIRA (<i>Opuntia</i> spp. e <i>Nopalea</i> spp.)	19
5. BIOMASSA MICROBIANA E ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO.....	21
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	23
REFERÊNCIAS.....	23
CAPÍTULO II – LEGUMINOSA ARBÓREA EM SISTEMA AGROFLORESTAL AUMENTA OS ESTOQUES DE NITROGÊNIO E CARBONO NA CAMADA SUBSUPERFICIAL DO SOLO.....	31
1. INTRODUÇÃO.....	33
2. METODOLOGIA.....	34
3. RESULTADOS.....	38
4. DISCUSSÃO.....	40
5. CONCLUSÕES.....	43
REFERÊNCIAS.....	44

CAPÍTULO I – SISTEMA AGROFLORESTAL COMPOSTO POR SABIÁ E PALMA FORRAGEIRA EM AMBIENTE SEMIÁRIDO: UMA REVISÃO

RESUMO

Os principais problemas que ameaçam a segurança alimentar mundial, tanto na produção agrícola quanto na pecuária, são impactos ao meio ambiente causados pelas mudanças climáticas. Ocorrido em grande parte por ações antrópicas, com o uso intensivo do solo e desmatamento, ocasionando a degradação do solo, deixando-o improdutivo, além de aumentar as concentrações dos gases do efeito estufa na atmosfera. Assim, torna-se necessário a implementação de métodos mais sustentáveis. Nesse contexto, o sistema agroflorestal (SAF) é uma alternativa interessante quanto a sustentabilidade, pois consiste na combinação de pelo menos uma espécie arbórea e uma cultura agrícola, em alguns casos, podem incluir até animais na mesma área, sendo o SAF, reconhecido como um sistema eficiente no uso do solo, solução viável para enfrentar simultaneamente os problemas socioeconômicos e ambientais, preservando maior agrobiodiversidade, proporciona ganhos de diferentes fontes, aumento na renda dos produtores e a segurança da terra. Dentre as espécies utilizadas para composição de um SAF, destacam-se a família das leguminosas, a qual contém diversas espécies com capacidade de fixar N₂ através da simbiose com rizóbios, dentre estas, pode ser citada a sabiá, espécie nativa do bioma Caatinga, adaptada a diferentes condições climáticas e tipos de solo, vista como ótima opção para compor o SAF, especialmente em ambiente semiárido. No semiárido se destaca também, a palma forrageira, que devido a suas características morfológicas e fisiológicas, se adaptada muito bem a esses ambientes, sendo importante na alimentação animal e uma boa opção para consórcio, devido a seu crescimento relativamente mais lento. No entanto, poucos estudos abordam o SAF composto por sabiá e palma na região Semiárida, sobretudo, avaliando as melhorias que esse sistema proporciona ao solo da região. Sendo assim, estudos relacionados a biomassa microbiana, concentrações e estoques de C e N, são de grande importância, visto que esse sistema é uma alternativa viável para ambientes semiáridos para suprir alimentação animal, produção de madeira, reflorestamento, entre outros, com menor perturbação ao solo e meio ambiente.

Palavras-chave: Sistemas resilientes; *Mimosa caesalpinifolia* Benth.; *Opuntia* spp.; agrofloresta.

CHAPTER I – AGROFORESTRY SYSTEM COMPOSED OF SABIA AND FORAGE CACTUS IN A SEMIARID ENVIRONMENT: A REVIEW

ABSTRACT

The main problems threatening global food security, both in agricultural and livestock production, are environmental impacts caused by climate change. This is largely due to human actions, such as intensive land use and deforestation, leading to soil degradation, rendering it unproductive, and increasing concentrations of greenhouse gases in the atmosphere. Therefore, the implementation of more sustainable methods becomes necessary. In this context, agroforestry systems (AFS) are an interesting alternative in terms of sustainability, as they consist of the combination of at least one tree species and an agricultural crop; in some cases, they may even include animals in the same area. AFS, recognized as an efficient land use system, is a viable solution to simultaneously address socioeconomic and environmental problems, preserving greater agrobiodiversity, providing gains from different sources, increasing producers' income, and ensuring land security. Among the species used to compose an agroforestry system (AFS), the legume family stands out, containing several species capable of fixing nitrogen (N₂) through symbiosis with rhizobia. Among these, the sabiá, a native species of the Caatinga biome, adapted to different climatic conditions and soil types, can be mentioned, and is seen as an excellent option for composing an AFS, especially in semi-arid environments. Also noteworthy in the semi-arid region is the forage cactus, which, due to its morphological and physiological characteristics, adapts very well to these environments, being important in animal feed and a good option for intercropping due to its relatively slower growth. However, few studies address AFS composed of sabiá and cactus in the semi-arid region, especially evaluating the improvements that this system provides to the soil in the region. Therefore, studies related to microbial biomass, concentrations and stocks of C and N are of great importance, since this system is a viable alternative for semi-arid environments to supply animal feed, wood production, reforestation, among others, with less disturbance to the soil and environment.

Keywords: resilient systems; *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.; *Opuntia* spp.; agroforestry.

1. INTRODUÇÃO

Os principais problemas que ameaçam à segurança alimentar mundial, tanto na produção agrícola quanto na pecuária, são os impactos negativos ao meio ambiente causados pelas mudanças climáticas, com alterações significativas na temperatura e precipitação (Lira *et al.*, 2022; Malhi; Kaur; Kaushik, 2021; Zareian, 2021). Devido as ações antrópicas, as concentrações dos gases de efeito estufa (GEE), como metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e óxido nitroso (N₂O) têm aumentado de forma significativa, em 150, 40 e 20%, respectivamente (IPCC, 2015). Além disso, as baixas precipitações pluviais aliadas à altas temperaturas, ocasionam o déficit hídrico, que limita a produção agrícola, a pecuária e o desenvolvimento econômico, especialmente em regiões áridas e semiáridas (Lira *et al.*, 2022). Assim torna-se necessário à implementação de métodos mais sustentáveis (Raza *et al.*, 2021). Essa crise ambiental global exige a adoção de estratégias integradas de desenvolvimento rural sustentável, como a utilização de sistemas agroflorestais (Zerihun, 2020).

A utilização de sistemas agroflorestais (SAFs) é uma alternativa sustentável, sendo uma prática agrícola antiga já utilizada entre agricultores tradicionais no mundo, que utilizavam de uma abordagem holística ao uso da terra na qual árvores, culturas e, às vezes, animais são combinados dentro de uma área agrícola (Ntawuruhunga *et al.*, 2023). Essa combinação pode oferecer diversos benefícios através da sua adoção, associados à melhoria nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Fahad *et al.*, 2022). A utilização de sistemas agroflorestais promove uso dos recursos mais eficaz, em comparação com o monocultivo (Gebbru, 2015). Essa integração de espécies arbóreas com culturas agrícolas aumenta o teor de matéria orgânica do solo, maior disponibilidade de nutrientes, proporciona maiores estoques de carbono, fixação biológica de nitrogênio, diversificação das rendas agrícolas, redução de insumos externos, maior resiliência dos sistemas agrícolas às mudanças climáticas, entre outros (Amare; Darr, 2020; Chatterjee *et al.*, 2018; Fahad *et al.*, 2022; Marsden *et al.*, 2020; Ntawuruhunga *et al.*, 2023; Surki *et al.*, 2020). Existem diversas possibilidades de combinação de espécies para composição de sistemas agroflorestais, e são construídos com base nos princípios dos consórcios de plantas e/ou da rotação de culturas, exigindo escolha adequada de plantas para compor sistemas (Figueiredo *et al.*, 2025).

As espécies de plantas selecionadas para compor sistemas agroflorestais depende de muitos fatores, que incluem o conhecimento dos produtores sobre os sistemas, tipos

de plantas, capacidade financeira, tecnologias disponíveis, clima, fertilidade e estado de conservação do solo, pragas e doenças, benefícios e antagonismos do consórcio, demandas de mercado, entre outros (Figueiredo, et al., 2025; Smith et al., 2022). Nesse sentido, leguminosas arbóreas são um dos recursos vegetais muito promissores para compor sistemas agroflorestais (Figueiredo *et al.*, 2025). A maioria dessas plantas é conhecida por sua capacidade de fixar N₂ através de associações simbióticas com bactérias, com possibilidade de reduzir adubações inorgânicas de N e aumentar a oferta de forragem rica em proteína (Apolinário *et al.*, 2015; Dubeux Junior *et al.*, 2017).

Entre as árvores para serem usadas nesses sistemas, destaca-se a leguminosa *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth., popularmente conhecida por “sabiá”, nativa e endêmica da região Nordeste do Brasil, espécie tolerante a seca, produz sementes de alta qualidade fisiológica e apresenta crescimento rápido (Araújo *et al.*, 2020; Drumond *et al.*, 2004; Izidro *et al.*, 2024). Sua madeira é resistente a cupins xilófagos, com valor econômico significativo para o Semiárido brasileiro, onde é explorada para produção de carvão vegetal, cercas vivas e estacas (Araujo; Paes, 2018; Dubeux Junior *et al.*, 2017). Outra cultura muito importante para essa região é a palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.), originária do México, é uma cultura importante como fonte de forragem para rebanhos em regiões semiáridas (Camelo *et al.*, 2021), devido sua rusticidade e adaptação ao tipo de clima da região (Almeida *et al.*, 2019), sendo uma excelente alternativa para composição de agrofloresta no Semiárido. Com plantas de desenvolvimento lento, a palma pode ser uma alternativa promissora para o cultivo em consórcio, diversificando e aumentando a produção de alimentos (Jardim *et al.*, 2020).

Embora os SAFs promovam inúmeros benefícios, como melhoria na qualidade do solo, melhor aproveitamento dos recursos, menor degradação ao solo e meio ambiente, entre outros, pouco ainda é trabalhado em regiões semiáridas, principalmente, com o consórcio da palma forrageira com espécies leguminosas arbóreas, que possuem capacidade de fixação biológica de nitrogênio (FBN), sendo uma opção viável e ecológica (Salviano *et al.*, 2023). Alguns estudos abordam o sistema de consórcio da palma forrageira com leguminosas, avaliando o desempenho no crescimento e produtividade dessas espécies, mas, poucos abordam a fixação biológica de nitrogênio e/ou estoques de carbono do solo que as leguminosas arbóreas podem proporcionar ao sistema, como o trabalho de (Camelo *et al.*, 2021), investigando o efeito consorciado da palma forrageira com as espécies leguminosas gliricídia (*Gliricidia sepium*) e leucena (*Leucaena leucocephala*) sobre a biomassa microbiana do solo e a matéria orgânica no Semiárido

pernambucano, verificaram que a presença de leguminosas favoreceu a microbiota do solo, sobretudo na estação chuvosa, apresentando redução de perda de C-CO₂, sem indicação de estresse metabólico e maior biomassa microbiana e quociente microbiano em relação à palma forrageira em monocultivo.

Diante deste cenário, estudos relacionados as melhorias aos estoques de C e N e da biomassa microbiana em solos cultivados com a sabiá em consórcio com a palma forrageira, são de suma importância, visto que essas espécies possuem características favoráveis ao cultivo no Semiárido, se mostrando como uma alternativa com uso de sistemas agroflorestais na região, proporcionando produção de forragem, exploração da madeira, de maneira mais ecológica e menor degradação do solo e meio ambiente. Nesse sentido, objetivou-se com esta revisão, destacar o sistema agroflorestal no semiárido, avaliando qual o efeito que a sabiá pode proporcionar a cultura da palma, e qual a influência do consórcio entre essas espécies na biomassa microbiana e estoques de C e N.

2. SISTEMA AGROFLORESTAL

Atualmente, a área de solo degradado aumenta gradativamente, impulsionada pelo seu uso inadequado para a produção agrícola, como por exemplo o preparo intensivo do solo e o monocultivo, ocasionando redução na produtividade, aumento de pragas e doenças e degradação dos recursos naturais (Balbino *et al.*, 2011). Ainda assim, devido ao rápido crescimento da população mundial, a produção agrícola deve continuar, mesmo que às custas da expansão da terra, ocasionando mudanças significativas no uso dos recursos naturais (Mukhlis; Rizaludin; Hidayah, 2022; Reshad *et al.*, 2026). Com isso, tem sido adotadas diversas iniciativas para enfrentar os desafios da degradação dos recursos naturais e promover uma agricultura mais sustentável (Ahmad; Caihong; Ekanayake, 2021), como a adoção de sistemas agroflorestais (SAFs) (Hemel *et al.*, 2022; Reshad; Asfaw; Mohammed, 2025; Sheppard *et al.*, 2020).

O sistema agroflorestal consiste na combinação de pelo menos dois tipos diferentes de plantas, sempre com a inclusão de uma espécie perene lenhosa, em alguns incluem até animais na mesma área (Sheppard *et al.*, 2020). É reconhecido como um sistema eficiente no uso do solo, sendo uma solução viável para enfrentar simultaneamente os problemas socioeconômicos e ambientais, além de mais lucrativo financeiramente em comparação com o cultivo tradicional (Amare *et al.*, 2019; Rahman *et al.*, 2012). Ao contrário dos sistemas convencionais, os sistemas agroflorestais podem manter maior agrobiodiversidade, proporcionar ganhos de diferentes fontes, aumento na

renda dos produtores e a segurança da terra (Córdova; Hogarth; Kanninen, 2018). Segundo Torralba et al. (2016), a agrofloresta é um sistema agrícola mais sustentável em comparação com a agricultura convencional e a silvicultura, pois mantém a biodiversidade e fornece serviços ecossistêmicos sem comprometer a produtividade.

O SAF pode melhorar os retornos econômicos, proporcionando uma forma de obter maior lucratividade em uma agricultura intensiva sustentável (Marçal *et al.*, 2022; Rosa-Schleich *et al.*, 2019). De acordo com Kim; Kirschbaum; Beedy, (2016), os sistemas agroflorestrais com o cultivo consorciado armazenam, em média, cerca de 2 t C ha⁻¹ ano⁻¹ em solo sob vegetação jovem (média de 14 anos), sequestrando 7,2 t C ha⁻¹ ano⁻¹, com o sequestro de C da biomassa contribuindo com cerca de 70% e o sequestro de C do solo contribuindo com cerca de 30%. A utilização desses sistemas que combinam árvores, pastagem e até animais na mesma área, têm potencial de fornecer diferentes serviços ecossistêmicos, com melhorias na ciclagem de nutrientes, reduzir emissão dos gases do efeito estufa, controle de pragas e doenças, diversificação de produtos, entre outros (Apolinário *et al.*, 2015; Dubeux Junior *et al.*, 2017; Izidro *et al.*, 2024). O uso de leguminosas arbóreas nesse sistema tem sido indicado como uma excelente alternativa, principalmente, devido ao potencial de fixação biológica de nitrogênio, contribuindo com a redução no uso de fertilizantes nitrogenados, melhorando a sustentabilidade do sistema (Costa et al., 2021; Silva et al., 2021; Figueiredo et al., 2023; Simioni et al., 2022), sendo a *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth., uma árvore com potencial para ser utilizada em um sistema agroflorestral, especialmente em regiões semiáridas.

3. SABIÁ (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.)

Mimosa caesalpiniiifolia Benth., popularmente conhecida por sabiá, angiquinho-sabiá, sansão-do-campo e unha de gato, é uma espécie arbórea pertencente à família Leguminosae, nativa do bioma Caatinga, com ocorrência natural em Minas Gerais e praticamente todos os estados do Nordeste do Brasil, exceto Alagoas, Bahia e Sergipe (Carvalho, 2007). Adaptada a diferentes condições climáticas e tipos de solo, possui rápido crescimento, podendo alcançar 4 m de altura aos 2 anos de idade, sendo capaz de fornecer forragem com altos níveis de produção de madeira (Carvalho, 2007; Herrera *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2021).

Devido sua rusticidade e alta capacidade de regeneração, a *M. caesalpiniiifolia* requer baixos níveis de fertilidade e umidade do solo, se desenvolvendo bem em solos profundos e arenosos (Carvalho, 2007). Essa espécie leguminosa apresenta diversos usos,

como em cercas vivas (Sousa *et al.*, 2024), reflorestamento e restauração de áreas degradadas (Pareyn; Araujo; Drumond, 2018). Plantas de sabiá oferecem benefícios nutricionais significativos para a alimentação animal, apresentando geralmente níveis de proteína que superam os presentes em gramíneas (Carvalho *et al.*, 2022). Além disso, essa espécie tem potencial para ser utilizada como planta apicultural, sendo uma escolha preferida para várias abelhas nativas e exóticas (Barth; Freitas; Vanderborght, 2020). Além disso, a *M. caesalpiniiifolia* tem capacidade fixar nitrogênio, através de associação simbiótica (Apolinário *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2019), destacando-se como uma ótima opção para compor sistemas agroflorestais.

Pelas inúmeras vantagens que leguminosas arbóreas oferecem com sua incorporação em agrossistemas, que incluem a fixação de N₂ e reciclagem de nutrientes por meio de deposição de serrapilheira (Muir *et al.*, 2019), tem sido muito trabalhado a inclusão de sabiá em sistemas agroflorestais. Lira Junior *et al.*, (2020), trabalhando com sistema agroflorestal composto pela gramínea *Brachiaria decumbens* e as leguminosas *Gliricidia sepium* e *M. caesalpiniiifolia* e, verificaram que a adição das árvores aumentou os estoques de C e N, em comparação do monocultivo da gramínea. Já Pessoa *et al.*, (2025), avaliando os sistemas de monocultivo de *Urochloa decumbens* Stapf. e *M. caesalpiniiifolia* e o consórcio dessas espécies, observaram que a inclusão da leguminosa aumentou o teor e os estoques de N sem perturbação considerável ao solo. No entanto, poucos estudos abordam sistemas agroflorestais composto com árvores de sabiá avaliando parâmetros microbiológicos e sua influência nas concentrações e estoques de C e N, sobretudo em consórcio com a palma forrageira, cultura de grande importância para regiões semiáridas, devido sua adaptação ao clima da região e o uso na alimentação de ruminantes.

4. PALMA FORRAGEIRA (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.)

A palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.) têm como centro de origem o México, pertencente da família das cactáceas, vêm se expandindo para todo continente americano em sistemas de cultivo e silvestre, além disso também se difundiu pela Ásia, África, Europa e Oceania, apresentando boa adaptação a diferentes climas, sendo cultivada em regiões áridas e semiáridas de todo o mundo (Cavalcante *et al.*, 2014; Jardim *et al.*, 2021b; Salvador *et al.*, 2021). A família Cactaceae apresenta 178 gêneros, com aproximadamente 2000 espécies conhecidas, porém os gêneros *Opuntia* e *Nopalea* são os mais utilizados para a produção de forragem em ambientes áridos, devido às suas

características morfofisiológicas altamente adaptáveis (Jardim *et al.*, 2020; Salvador *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2019).

Espécies de palma forrageira são altamente eficientes no uso da água, por conta do seu metabolismo ácido das crassuláceas (MAC) (Silva *et al.*, 2025), realizando assimilação de CO₂ normalmente durante a noite, com auxílio da fosfoenolpiruvato carboxilase, através da abertura dos seus estômatos no período noturno, com fechamento estomático no período diurno, impedindo a perda de água para atmosfera pela transpiração, condicionando o seu desenvolvimento em ambientes com déficit hídrico e altas temperaturas (Jardim *et al.*, 2021a; Salvador *et al.*, 2021). Apresentam tolerância a secas, altas temperaturas e solos de baixa fertilidade (Aguiar *et al.*, 2019; Almeida *et al.*, 2019; Lira *et al.*, 2022). Essas características são ideais para ambientes áridos e semiáridos, sendo de grande importância para alimentação animal (Rocha Filho *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2025), onde apesar das condições climáticas, a palma forrageira mantém os constituintes nutricionais e a capacidade produtiva que é essencial para os rebanhos (Jardim *et al.*, 2021b; Meza-Herrera *et al.*, 2019). Entretanto, a escassez de água pode influenciar diretamente o crescimento, desenvolvimento e a produção de biomassa (Jha; Srivastava, 2018; Mbarki *et al.*, 2018). Com isso, a utilização de cultivo consorciado, pode mitigar o estresse hídrico pela escassez de água na região (Liu *et al.*, 2018).

Para a palma forrageira, a implantação de um sistema consorciado pode ser uma alternativa interessante, tendo em vista que essa cultura apresenta um desenvolvimento lento e não deve ser fornecido de forma exclusiva aos animais por poder promover problemas ruminas, diarreia e redução nos teores de gordura do leite, além disso o sistema consorciado favorece o maior aproveitamento da área de cultivo, aumento da atividade microbiológica do solo e aumento da produção de forragem (Aguiar *et al.*, 2015; Cardoso *et al.*, 2019; Jardim *et al.*, 2021b). O consorcio é apontado como um dos métodos mais viáveis para melhorar a eficiência no uso da água na produção agrícola (Raza *et al.*, 2021; Ren *et al.*, 2019). De maneira geral, o sistema de consórcio pode diminuir o escoamento superficial, aumentar o teor de água do solo, melhora o funcionamento da comunidade microbiana do solo, aumenta a eficiência dos recursos, como luz solar, água e nutrientes, além de reduzir pragas e doenças, aumentando assim a produtividade das culturas (Du *et al.*, 2018; Gitari *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2018; Rahman *et al.*, 2017; Raza *et al.*, 2021).

Atualmente, já é trabalhado o consórcio da palma forrageira com sorgo (Jardim *et al.*, 2021b), gliricídia (Oliveira *et al.*, 2020) e leucena (Camelo *et al.*, 2021), na região

semiárida brasileira e, verificaram que promoveram o uso eficiente da microbiota da água e do solo e aumentaram a produção e diversidade de alimento para os rebanhos. Entretanto, há poucas informações sobre na literatura sobre sistemas agroflorestais compostos pelo consórcio entre essa cactácea e leguminosas arbóreas que avaliem a influência do sistema na biomassa microbiana, fixação de N₂ e os estoques de C e N, especialmente a *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth., espécie arbórea que é nativa da Caatinga, com potencial para ser utilizada em reflorestamento, produção de lenha, fornecer ração para animais, além poder adicionar N ao sistema de cultivo (Damasceno; Ferrari; Giordani, 2017; Lira *et al.*, 2022; Podadera *et al.*, 2015).

5. BIOMASSA MICROBIANA E ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO

O solo utilizado para produção agrícola, cobre cerca de 5 bilhões de hectares, equivalente a 38% da superfície terrestre total, com um terço desta área utilizada para lavouras, sendo o restante composto por pastagens cultivadas e naturais (Coêlho *et al.*, 2024; FAO, 2020). Se continuarem com o desenvolvimento rural intensivo atual, é esperado um déficit hídrico de aproximadamente 30% até 2030 e, quase 95% das áreas terrestres do planeta podem ser tornar degradadas até 2050 (FAO, 2021). Com isso, é fundamental utilizar sistemas que mitiguem a degradação do solo, enquanto aumentam a produção agrícola, como os sistemas agroflorestais, uma prática multifuncional que combina árvores com culturas agrícolas, incluindo até animais, proporcionando a produção de forragem, assim como madeira e frutas ou oleaginosas (Calle, 2020; Coêlho *et al.*, 2024; Jose; Dollinger, 2019).

Têm sido estudadas diversas espécies arbóreas na composição de sistemas agroflorestais, principalmente árvores leguminosas, que oferecem vantagens como a fixação biológica de nitrogênio e ser uma alternativa de forrageira relativamente valiosa, por ser uma fonte de proteína vegetal (Grygier *et al.*, 2022). As leguminosas arbóreas podem proporcionar maior armazenamento de C e N, assim como melhorar as propriedades físicas do solo, devido ao maior aporte de matéria orgânica, por meio da queda de folhas, exsudação de raízes e renovação radicular sob suas copas, promovendo o acúmulo de nutrientes e matéria orgânica do solo e estimulando a atividade microbiana (Coêlho *et al.*, 2024; Vazquez *et al.*, 2020). A *M. caesalpiniiifolia* Benth. é uma leguminosa arbórea originária da Caatinga e possui grande importância econômica no setor florestal regional, devido a resistência da sua madeira a cupins xilófagos (Araujo; Paes, 2018). Em sistemas agroflorestais, esta espécie pode promover o ciclo de nutrientes,

a aeração do solo, o estoque de carbono e também o bem-estar animal, promovido pela sombra, além disso pode aumentar a disponibilidade de N no solo, com a fixação de N₂, através de associações simbióticas com rizóbios (Coêlho *et al.*, 2024; Costa *et al.*, 2016; Dubeux Junior *et al.*, 2017; Muir *et al.*, 2019).

O cultivo de leguminosas com culturas agrícolas aumenta a disponibilidade de N para o sistema, promove maior deposição de serrapilheira, raízes e nódulos de plantas leguminosas, favorecendo o ciclo de nutrientes e melhora as características químicas, físicas e biológicas do solo (Camelo *et al.*, 2021; Schumacher *et al.*, 2018). Dubeux Junior *et al.* (2017) verificaram que o consórcio entre *Urochloa decumbens* e *Gliricidia sepium* aumentou o teor de matéria orgânica do solo, e dos níveis de C e N do solo em cerca de 37% e 82% do solo, respectivamente, em comparação com *U. decumbens* em monocultivo. Já Pessoa *et al.*, (2025), observaram que a inclusão da *M. caesalpiniiifolia* Benth. combinada em uma área de silvopastagem com *U. decumbens*, aumenta o teor e os estoques de nitrogênio, sem alterar o qMIC e qCO₂ do solo. De acordo com Cruz *et al.*, (2018), microrganismos são bons indicadores da qualidade da matéria orgânica e do nível de perturbação nos sistemas edáficos.

Exsudatos radiculares liberados em sistema de consórcio entre leguminosas e gramíneas afetam a comunidade microbiana do solo, sendo uma das principais formas de incorporação de carbono da biomassa microbiana, principalmente em regiões de clima tropical, após período chuvoso (Baath, 2018; Cardinael *et al.*, 2017). O sistema de manejo afeta diretamente a microbiota do solo das regiões semiáridas, sendo um dos principais fatores de perturbação e variações da comunidade microbiana (Ding *et al.*, 2013; Singh *et al.*, 2018). Lira Junior *et al.*, (2020a), identificaram que também a uma mudança na biomassa microbiana, à medida que se afasta das árvores leguminosas. Por outro lado, Camelo *et al.*, (2021) verificaram que o carbono microbiano é maior nos sistemas agroflorestais ao final da estação chuvosa, entretanto apresentaram efeitos semelhantes nos teores de C e N do solo em comparação com o monocultivo de palma forrageira.

Leguminosas arbóreas podem aumentar os estoques de N, especialmente nas camadas mais profundas do solo, devido a suas raízes principais podem explorar maior profundidade do solo, além disso esse aumento de N possivelmente está associado à fixação de N e à decomposição de raízes (Kähkölä *et al.*, 2012; Pessoa *et al.*, 2025; Thilakarathna *et al.*, 2016). Vários estudos identificaram melhorias no ciclo de nutrientes e aumento nos estoques de C e N em sistemas agroflorestais, sobretudo nas camadas superiores do solo até 30cm, onde se concentram os maiores reservatórios de carbono

(Cardinael *et al.*, 2017). Cá *et al.* (2022), verificaram maior reciclagem de nutrientes e aumento nos estoques de C e N nas camadas superiores a 10cm até 1m de profundidade, em sistemas silvopastoril composto por árvores leguminosas. A *M. caesalpinifolia* Benth. possui raízes que se beneficiam através da associação com rizóbios, que influenciam na dinâmica do armazenamento de nitrogênio do solo (Barros *et al.*, 2018; Lira Junior *et al.*, 2020b; Oliveira *et al.*, 2019).

Apesar dos efeitos relativamente positivos dos sistemas agroflorestais com inclusão de leguminosas, há ainda uma limitação de informações na literatura sobre esses sistemas sendo compostos pela *M. caesalpinifolia* em consórcio com espécies de palma forrageira em regiões semiáridas, especialmente com avaliações da leguminosa na biomassa microbiana, assim como nos teores e estoques de C e N, assim como a sua influência no desenvolvimento e qualidade nutricional da cactácea.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso intensivo do solo aliado ao desmatamento são um dos principais fatores da emissão de gases do efeito estufa e degradação dos solos em todo o planeta, assim, torna-se necessário a adoção de práticas mais sustentáveis na produção agrícola, como o sistema agroflorestal, pois permite maior eficiência no uso dos recursos naturais, proporciona uma agricultura mais sustentável, diversifica a produção e aumenta as fontes de renda para os produtores. Além disso, é uma prática muito importante para regiões semiáridas, caracterizadas por altas temperaturas e longos períodos de estiagem. Com a utilização da palma forrageira em consórcio com a sabiá, espera-se se obter um aumento nos teores e estoques de C e N, maior atividade microbiana com menor perturbação do solo.

REFERENCIAS

- AGUIAR, M. D. S. M. A. *et al.* Forage cactus in diets of confined dairy cattle: Performance and economic viability. **Semina: Ciências Agrárias**, vol. 36, nº 2, p. 1013–1030, 2015.
- AGUIAR *et al.* Vulnerabilidade da Palma Forrageira e pecuária bovina no Estado da Paraíba frente ao ataque da cochonilha do carmim Vulnerability of the Palm forage and cattle ranching in the state of Paraíba against the attack of carmine cochineal. **REGNE**, vol. 5, 2019. Disponível em: <http://www.periodicos.ufrn.br/revistadoregne>.
- AHMAD, S.; CAIHONG, Z.; EKANAYAKE, E. M. B. P. Livelihood improvement through agroforestry compared to conventional farming system: Evidence from Northern irrigated plain, Pakistan. **Land**, vol. 10, nº 6, 2021.
- ALMEIDA, H. A. de *et al.* Social and Productive Indicators of Forage Palm and the Survival of Livestock Activity in the Semi-arid Region of Northeastern Brazil. **Asian Journal of Advances in Agricultural Research**, p. 1–12, 2019.
- AMARE, D. *et al.* Agroforestry of Smallholder Farmers in Ethiopia: Practices and Benefits. **Small-scale Forestry**, vol. 18, nº 1, p. 39–56, 2019.
- AMARE, D.; DARR, D. Agroforestry adoption as a systems concept: A review. **Forest Policy and Economics**, vol. 120, 2020.
- APOLINÁRIO, V. X. O. *et al.* Tree legumes provide marketable wood and add nitrogen in warm-climate silvopasture systems. **Agronomy Journal**, vol. 107, nº 5, p. 1915–1921, 2015.
- ARAÚJO, F. dos S. *et al.* SEED QUALITY AND GENETIC DIVERSITY OF A CULTIVATED POPULATION OF *Mimosa caesalpiniiifolia* BENTH. **Revista Caatinga**, vol. 33, p. 1000–1006, 2020.
- ARAÚJO, J. B. S.; PAES, J. B. Natural Wood Resistance of *Mimosa caesalpiniiifolia* in Field Testing. **Floresta e Ambiente**, p. e20150128, 2018.
- BAATH, E. Temperature sensitivity of soil microbial activity modeled by the square root equation as a unifying model to differentiate between direct temperature effects and microbial community adaptation. **Global Change Biology**, vol. 24, nº 7, p. 2850–2861, 2018.
- BALBINO, L. C. *et al.* Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesq. agropec. bras.** Brasília. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000001>. Acesso em: 10 mar. 2025.
- BARROS, F. M. do R. *et al.* Silvopastoral systems drive the nitrogen-cycling bacterial community in soil. **Ciência e Agrotecnologia**, vol. 42, nº 3, p. 281–290, 2018.
- BARTH, O. M.; FREITAS, A. da S. de; VANDERBORGHT, B. Pollen preference of stingless bees (*Melipona rufiventris* and *M. quadrifasciata anthidioides*) inside an urban

tropical forest at Rio de Janeiro city. **Journal of Apicultural Research**, vol. 59, n° 5, p. 1005–1010, 2020.

CÁ, J. *et al.* C and N stocks in silvopastoral systems with high and low tree diversity: Evidence from a twenty-two year old field study. **Science of the Total Environment**, vol. 833, 2022.

CALLE, A. Partnering with cattle ranchers for forest landscape restoration. **Ambio**, vol. 49, n° 2, p. 593–604, 2020.

CAMELO, D. *et al.* Soil microbial activity and biomass in semiarid agroforestry systems integrating forage cactus and tree legumes. **Agronomy**, vol. 11, n° 8, 2021.

CARDINAEL, R. *et al.* Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, vol. 236, p. 243–255, 2017.

CARDOSO, D. B. *et al.* Levels of inclusion of spineless cactus (*Nopalea cochenillifera* Salm Dyck) in the diet of lambs. **Animal Feed Science and Technology**, vol. 247, p. 23–31, 2019.

CARVALHO, P. E. R. *Espécies Arbóreas Brasileiras*. Brasília, DF. 2007.

CARVALHO, C. B. de M. *et al.* Nutritive value of *Urochloa decumbens* Stapf R. D. Webster and *Mimosa caesalpinhiifolia* Benth. and performance of cattle in monoculture and silvopastoral systems, in the Agreste region of Pernambuco. **Tropical Animal Health and Production**, vol. 54, n° 4, 2022.

CAVALCANTE, L. A. D. *et al.* Respostas de genótipos de palma forrageira a diferentes densidades de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, vol. 44, p. 424–433, 2014.

CHATTERJEE, N. *et al.* Changes in soil carbon stocks across the Forest-Agroforest-Agriculture Pasture continuum in various agroecological regions A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, vol. 266, p. 55–67, 2018.

COÊLHO, D. de L. *et al.* Can silvopasture with arboreal legumes increase root mass at deeper soil layers and improve soil aggregation? **Soil Science Society of America Journal**, 2024.

CÓRDOVA, R.; HOGARTH, N. J.; KANNINEN, M. Sustainability of smallholder livelihoods in the Ecuadorian highlands: A comparison of agroforestry and conventional agriculture systems in the indigenous territory of Kayambi People. **Land**, vol. 7, n° 2, 2018.

COSTA, S. B. de M. *et al.* Livestock performance in warm-climate silvopastures using tree legumes. **Agronomy Journal**, vol. 108, n° 5, p. 2026–2035, 2016.

COSTA, S. B. de M. *et al.* Proportion and digestibility of tree legumes in diets of grazing cattle in a tropical silvopastoral system. **Livestock Science**, vol. 252, 2021.

CRUZ, A. B. *et al.* Cultivation of *Opuntia ficus-indica* under different soil management practices: A possible sustainable agricultural system to promote soil carbon

- sequestration and increase soil microbial biomass and activity. **Land Degradation & Development**, vol. 29, p. 38–46, 2018.
- DAMASCENO, G. A. de B.; FERRARI, M.; GIORDANI, R. B. *Prosopis juliflora* (SW) D.C., an invasive specie at the Brazilian Caatinga: phytochemical, pharmacological, toxicological and technological overview. **Springer Netherlands**, 2017.
- DING, G. C. *et al.* Changes of Soil Bacterial Diversity as a Consequence of Agricultural Land Use in a Semi-Arid Ecosystem. **PLOS ONE**, vol. 8, nº 3, 2013.
- DRUMOND, M. A. *et al.* Estratégias para o uso sustentável da biodiversidade da Caatinga. **Embrapa**, 2004.
- DU, J. bo *et al.* Maize-soybean strip intercropping: Achieved a balance between high productivity and sustainability. **Chinese Academy of Agricultural Sciences**, 2018.
- DUBEUX JUNIOR, J. C. B. *et al.* Tree legumes: An underexploited resource in warm-climate silvopastures. **Sociedade Brasileira de Zootecnia**, 2017.
- FAHAD, S. *et al.* Agroforestry Systems for Soil Health Improvement and Maintenance. **MDPI**, 2022.
- FAO**. Land use in agriculture by the numbers. 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/sustainability/news/detail/en/c/1274219/>. Acesso em: 12 fev. 2026.
- FAO**. ONU aponta conectividade como resposta para o desenvolvimento em áreas rurais. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1401429/>. Acesso em: 12 fev. 2026.
- FIGUEIREDO, C. C. de *et al.* Nitrogen Use Efficiency in an Agrisilviculture System with *Gliricidia sepium* in the Cerrado Region. **Plants**, vol. 12, nº 8, 2023.
- FIGUEIREDO, T. L. *et al.* Urea fertilization reduced biological N₂ fixation but did not impact the development of legume trees in an agroforestry system. **Plant and Soil**, 2025.
- GEBRU, H. A Review on the Comparative Advantage of Intercropping Systems. *Journal of Biology*, **Agriculture and Healthcare**, vol. 5, nº 7, 2015. Disponível em: www.iiste.org.
- GITARI, H. I. *et al.* Optimizing yield and economic returns of rain-fed potato (*Solanum tuberosum* L.) through water conservation under potato-legume intercropping systems. **Agricultural Water Management**, vol. 208, p. 59–66, 2018.
- GRYGIER, A. *et al.* Seven underutilized species of the Fabaceae family with high potential for industrial application as alternative sources of oil and lipophilic bioactive compounds. **Industrial Crops and Products**, vol. 186, 2022.
- HEMEL, S. A. K. *et al.* Improvement of Farmers' Livelihood through Choi Jhal (*Piper chaba*)-Based Agroforestry System: Instance from the Northern Region of Bangladesh. **Sustainability (Switzerland)**, vol. 14, nº 23, 2022.
- HERRERA, A. M. *et al.* Potential of *Gliricidia sepium* (jacq.) Kunth ex Walp. and *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. in silvopastoral systems intercropped with signalgrass

[Urochloa decumbens (Stapf) R.D. Webster]. **Agroforestry Systems**, vol. 95, n° 6, p. 1061–1072, 2021.

IPCC. Climate change 2014: synthesis report : longer report. Genebra, Suíça: [Intergovernmental Panel on Climate Change], 2015.

IZIDRO, J. L. P. S. *et al.* Dendrometry, production, and nutritional value of Mimosa caesalpiniiifolia (Leguminosae) under monocrop and silvopastoral system1. **Agroforestry Systems**, vol. 98, n° 8, p. 2897–2910, 2024.

JARDIM, A. M. da R. F. *et al.* Genotypic differences relative photochemical activity, inorganic and organic solutes and yield performance in clones of the forage cactus under semi-arid environment. **Plant Physiology and Biochemistry**, vol. 162, p. 421–430, 2021a.

JARDIM, A. M. da R. F. *et al.* Interação de agroecossistema consorciado com palma-sorgo em ambiente semiárido: uma revisão. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, vol. 5, n° 1, p. 069–087, 2020.

JARDIM, A. M. da R. F. *et al.* Intercropping forage cactus and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. **Journal of Arid Environments**, vol. 188, 2021b.

JHA, S.; SRIVASTAVA, R. Impact of drought on vegetation carbon storage in arid and semi-arid regions. Remote Sensing Applications: **Society and Environment**, vol. 11, p. 22–29, 2018.

JOSE, S.; DOLLINGER, J. Silvopasture: a sustainable livestock production system. **Springer Netherlands**, 2019.

KÄHKÖLÄ, A. K. *et al.* Leaf and root litter of a legume tree as nitrogen sources for cacaos with different root colonisation by arbuscular mycorrhizae. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, vol. 92, n° 1, p. 51–65, 2012.

KIM, D. G.; KIRSCHBAUM, M. U. F.; BEEDY, T. L. Carbon sequestration and net emissions of CH₄ and N₂O under agroforestry: Synthesizing available data and suggestions for future studies. **Elsevier B.V.**, 2016.

LIRA, E. C. de *et al.* Intercropping forage cactus genotypes with wood species in a semi-arid environment. **Agronomy Journal**, vol. 114, n° 6, p. 3173–3182, 2022.

LIRA JUNIOR, M. A. *et al.* Legume silvopastoral systems enhance soil organic matter quality in a subhumid tropical environment. **Soil Science Society of America Journal**, vol. 84, n° 4, p. 1209–1218, 2020a.

LIRA JUNIOR, M. A. *et al.* Legume-based silvopastoral systems drive C and N soil stocks in a subhumid tropical environment. **Catena**, vol. 189, 2020b.

LIU, X. *et al.* Relationships among light distribution, radiation use efficiency and land equivalent ratio in maize-soybean strip intercropping. **Field Crops Research**, vol. 224, p. 91–101, 2018.

MALHI, G. S.; KAUR, M.; KAUSHIK, P. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. **MDPI**, 2021.

MARÇAL, M. F. M. *et al.* Potential Use of Quartzipisamment under Agroforestry and Silvopastoral System for Large-Scale Production in Brazil. **Agronomy**, vol. 12, nº 4, 2022.

MARSDEN, C. *et al.* How agroforestry systems influence soil fauna and their functions - a review. **Plant and Soil**, vol. 453, nº 1–2, p. 29–44, 2020.

MBARKI, S. *et al.* Alfalfa crops amended with MSW compost can compensate the effect of salty water irrigation depending on the soil texture. **Process Safety and Environmental Protection**, vol. 115, p. 8–16, 2018.

MEZA-HERRERA, C. A. *et al.* The Opuntia effect upon the out-of-season embryo implantation rate in goats - Corpus luteal number, corpus luteal diameter and serum progesterone concentrations. **Livestock Science**, vol. 228, p. 201–206, 2019.

MUIR, J. P. *et al.* Value of endemic legumes for livestock production on Caatinga rangelands. **Revista Brasileirade Ciencias Agrarias**, 2019.

MUKHLIS, I.; RIZALUDIN, M. S.; HIDAYAH, I. Understanding Socio-Economic and Environmental Impacts of Agroforestry on Rural Communities. **Forests**, vol. 13, nº 4, 2022.

NTAWURUHUNGA, D. *et al.* Climate-smart agroforestry systems and practices A systematic review of what works, what doesn't work, and why. **Forest Policy and Economics**, nº 150, p. 102937, 2023.

OLIVEIRA, F. F. C. de *et al.* Crescimento, biomassa e eficiência de uso da água em genótipos de palma forrageira consorciados com plantas de gliricídia, em respostas ao hidrogel. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, vol. 13, nº 6, p. 3773–3782, 2020.

OLIVEIRA, I. S. R. de *et al.* Mimosa caesalpiniiifolia Benth. adapts to rhizobia populations with differential taxonomy and symbiotic effectiveness outside of its location of origin. **FEMS Microbiology Ecology**, vol. 95, nº 8, 2019.

PAREYN, F. G. C.; ARAUJO, E. de L.; DRUMOND, M. A. Mimosa caesalpiniiifolia - Sabiá.

PESSOA, D. V. *et al.* Legume trees in an established tropical grass pasture increase deep-soil N stocks. **European Journal of Agronomy**, vol. 164, 2025.

PODADERA, D. S. *et al.* Influence of Removal of a Non-native Tree Species Mimosa caesalpiniiifolia Benth. on the Regenerating Plant Communities in a Tropical Semideciduous Forest Under Restoration in Brazil. **Environmental Management**, vol. 56, nº 5, p. 1148–1158, 2015.

RAHMAN, S. A. *et al.* Agroforestry for Livelihood Security in Agrarian Landscapes of the Padma Floodplain in Bangladesh. **Small-scale Forestry**, vol. 11, nº 4, p. 529–538, 2012.

- RAHMAN, T. *et al.* Water use efficiency and evapotranspiration in maize-soybean relay strip intercrop systems as affected by planting geometries. **PLOS ONE**, vol. 12, nº 6, 2017.
- RAZA, M. A. *et al.* Land productivity and water use efficiency of maize-soybean strip intercropping systems in semi-arid areas: A case study in Punjab Province, Pakistan. **Journal of Cleaner Production**, vol. 308, 2021.
- REN, J. *et al.* Intercropping potato (*Solanum tuberosum* L.) with hairy vetch (*Vicia villosa*) increases water use efficiency in dry conditions. **Field Crops Research**, vol. 240, p. 168–176, 2019.
- RESHAD, M. *et al.* Comparative analysis of agroforestry and Non-agroforestry practices for sustainable livelihoods in Eastern Ethiopia. **Discover Sustainability**, vol. 7, nº 1, 2026.
- RESHAD, M.; ASFAW, Z.; MOHAMMED, M. Benefits and challenges of smallholder farmers adopting agroforestry: evidences from the Eastern escarpment of Chercher massive, southeast Ethiopia. **Agroforestry Systems**, vol. 99, nº 1, 2025.
- ROCHA FILHO, R. R. *et al.* Can spineless forage cactus be the queen of forage crops in dryland areas? **Journal of Arid Environments**, vol. 186, p. 104426, 2021.
- ROSA-SCHLEICH, J. *et al.* Ecological-economic trade-offs of Diversified Farming Systems – A review. **Elsevier B.V.**, 2019.
- SALVADOR, K. R. da S. *et al.* Intensificação de sistemas de produção de palma forrageira por meio de consorciação rotativa com gramíneas, leguminosas e oleaginosas: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2021.
- SALVIANO, A. M. *et al.* Plantas de cobertura em ambiente semiárido: produção de biomassa, adição de Carbono e de nutrientes ao solo. **DELOS: DESARROLLO LOCAL SOSTENIBLE**, vol. 16, nº 43, p. 835–852, 2023.
- SCHUMACHER, M. V. *et al.* Litter and nutrient input in seasonal forest in the central region of Rio Grande do sul state. **Ciencia Florestal**, vol. 28, nº 2, p. 532–541, 2018.
- SHEPPARD, J. P. *et al.* Agroforestry: An appropriate and sustainable response to a changing climate in Southern Africa? **MDPI**, 2020.
- SILVA, P. S. F. da *et al.* Morphological, Productive, and Pest Susceptibility Characteristics of Forage Cactus Clones in Semiarid Regions of Brazil. **Rangeland Ecology & Management**, vol. 103, p. 329–340, 2025.
- SILVA, I. A. G. da *et al.* Tree canopy management affects dynamics of herbaceous vegetation and soil moisture in silvopasture systems using arboreal legumes. **Agronomy**, vol. 11, nº 8, 2021.
- SIMIONI, G. F. *et al.* Response of birds to high biodiversity silvopastoral systems: Integrating food production and biodiversity conservation through applied nucleation in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, vol. 324, 2022.

- SINGH, R. *et al.* Soil Microbial Characteristics in Sub-Tropical Agro-Ecosystems of North Western Himalaya. **Current Science**, vol. 115, n° 10, p. 1956–1959, 2018.
- SMITH, L. G. *et al.* Assessing the multidimensional elements of sustainability in European agroforestry systems. **Agricultural Systems**, n° 197, p. 103357, 2022.
- SOUSA, D. L. da S. *et al.* Growth regulators on shooting and adventitious rooting of *Mimosa caesalpiniiifolia* adult stem cuttings. **Rhizosphere**, vol. 30, 2024.
- SOUZA, M. de S. *et al.* Practices for the improvement of the agricultural resilience of the forage production in semiarid environment: a review. **Amazonian Journal of Plant Research**, vol. 3, p. 417–430, 2019.
- SURKI, A. A. *et al.* The competitive effect of almond trees on light and nutrients absorption, crop growth rate, and the yield in almond-cereal agroforestry systems in semi-arid regions. **Agroforestry Systems**, vol. 94, p. 1111–1122, 2020.
- THILAKARATHNA, M. S. *et al.* Belowground nitrogen transfer from legumes to non-legumes under managed herbaceous cropping systems. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, vol. 36, n° 4, 2016.
- TORRALBA, M. *et al.* Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, vol. 230, p. 150–161, 2016.
- VAZQUEZ, E. *et al.* Pasture diversification affects soil macrofauna and soil biophysical properties in tropical (silvo)pastoral systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, vol. 302, 2020.
- ZAREIAN, M. J. Optimal water allocation at different levels of climate change to minimize water shortage in arid regions (Case Study: Zayandeh-Rud River Basin, Iran). **Journal of Hydro-Environment Research**, vol. 35, p. 13–30, 2021.
- ZERIHUN, M. F. Institutional Analysis of Adoption of Agroforestry Practices in the Eastern Cape Province of South Africa. **Southern African Journal of Environmental Education**, vol. 36, p. 37–55, 2020.

CAPÍTULO II – SISTEMA AGROFLORESTAL CACTUS-LEGUMINOSA AUMENTA OS ESTOQUES DE NITROGÊNIO E CARBONO NA CAMADA SUBSUPERFICIAL DO SOLO

RESUMO

A degradação do solo é uma preocupação global, pois seus efeitos implicam diretamente na segurança alimentar e qualidade de vida. Assim, é importante se utilizar de práticas mais conservacionistas, como o sistema agroflorestal (SAF). Investigamos um sistema agroflorestal ao longo de 18 meses em ambiente semiárido para determinar os estoques de N e C e biomassa microbiana no estado de Pernambuco, Brasil. O ensaio experimental foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, sob esquema de parcelas subdivididas 3 x 2, sendo as parcelas compostas por três sistemas de cultivo (monocultivo de palma e de sabiá, bem como sistema agroflorestal composto por ambas as espécies) e as subparcelas dois períodos de avaliação (12 e 18 meses após implantação dos sistemas). Realizou-se avaliações de amostras de solo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidades. A partir destas, determinou-se concentrações e estoques de N e C, densidade do solo, respiração basal do solo (RBS), carbono da biomassa microbiana (C_{mic}), quociente metabólico (qCO_2) e quociente microbiano ($qMIC$). Os períodos de avaliação influenciaram nos estoques de N e C e concentração de C na camada de 20-40 cm, obtendo as maiores médias após 18 meses, com $0,47 \text{ Mg ha}^{-1}$, $43,38 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $14,03 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente. Com relação aos parâmetros microbiológicos, o sistema afetou apenas o qCO_2 na camada de 20-40 cm, com maior média obtida no SAF, porém, igual ao monocultivo de palma. Já o período de avaliação afetou o C_{mic} e $qMIC$ independentemente da camada de solo, e o qCO_2 em 20-40 cm. Os resultados obtidos neste estudo indicam que os sistemas não causaram perturbação ao solo ($qMIC$ e qCO_2) e que a inclusão de sabiá pode ter levado a aumentos na concentração de C e estoques de N e C na camada subsuperficial do solo, após 1,5 anos do plantio.

Palavras-chave: Agrofloresta; *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.; *Opuntia stricta* (Haw) Haw.; biomassa microbiana.

CHAPTER II – CACTUS-LEGUME AGROFORESTRY SYSTEM INCREASES NITROGEN AND CARBON STOCKS IN THE SUBSURFACE SOIL LAYER

ABSTRACT

Soil degradation is a global concern, as its effects directly impact food security and quality of life. Therefore, it is important to utilize more conservationist practices, such as agroforestry systems (AFS). We investigated an agroforestry system over 18 months in a semi-arid environment to determine N and C stocks and microbial biomass in the state of Pernambuco, Brazil. The experimental trial was conducted in a randomized block design, under a 3 x 2 split-plot scheme, with the main plots composed of three cropping systems (monoculture of cactus and sabiá, as well as an agroforestry system composed of both species) and the subplots two evaluation periods (12 and 18 months after system implementation). Soil samples were evaluated at depths of 0-20 and 20-40 cm. From these, concentrations and stocks of N and C, soil density, basal soil respiration (BSR), microbial biomass carbon (C_{mic}), metabolic quotient (qCO₂), and microbial quotient (qMIC) were determined. The evaluation periods influenced the N and C stocks and C concentration in the 20-40 cm layer, obtaining the highest averages after 18 months, with 0.47 Mg ha⁻¹, 43.38 Mg ha⁻¹, and 14.03 g kg⁻¹, respectively. Regarding microbiological parameters, the system only affected qCO₂ in the 20-40 cm layer, with the highest average obtained in the agroforestry system, but equal to the cactus monoculture. The evaluation period affected C_{mic} and qMIC independently of the soil layer, and qCO₂ in the 20-40 cm layer. The results obtained in this study indicate that the systems did not cause soil disturbance (qMIC and qCO₂) and that the inclusion of sabiá may have led to increases in C concentration and N and C stocks in the subsoil layer, after 1.5 years of planting.

Keywords: Agroforestry; *Mimosa caesalpiniiifolia*; *Opuntia stricta* (Haw) Haw.; microbial biomass.

1. INTRODUÇÃO

O uso inadequado dos recursos naturais é um dos principais fatores do aumento na degradação do solo (Souza *et al.*, 2025). Cerca de 40% da área terrestre do planeta está atualmente degradada e continua aumentando, ameaçando diretamente o meio ambiente e praticamente metade da população global (Shao *et al.*, 2024). A degradação do solo segue sendo uma preocupação global significativa ao longo deste século, pois seus efeitos são prejudiciais sobre a produtividade, o meio ambiente, as propriedades do solo e suas implicações para a segurança alimentar e qualidade de vida (Chalise; Kumar; Kristiansen, 2019; Kooch *et al.*, 2024). Dessa forma, é importante buscar alternativas sustentáveis, que sejam viáveis, com práticas conservacionistas e resilientes, que protejam o solo, enquanto produzem alimentos, forragem, fibras e energia (Coêlho *et al.*, 2024), como os sistemas agroflorestais (SAFs).

Os sistemas agroflorestais se tornam uma excelente alternativa de cultivo sustentável, pois podem combinar simultaneamente diferentes tipos de culturas, como espécies arbóreas, frutíferas e plantas forrageiras, além da possibilidade da presença de animais em uma mesma área (Coêlho *et al.*, 2024; Pessoa *et al.*, 2025). Esses sistemas de cultivo oferecem diversos benefícios, como a proteção e conservação do solo, melhoria da fertilidade do solo, sequestro de carbono, fixação biológica de nitrogênio, entre outros (Fahad *et al.*, 2022; Figueiredo *et al.*, 2025; Marsden *et al.*, 2020; Ntawuruhunga *et al.*, 2023). No entanto, os sistemas agroflorestais são muito diversos quanto às possibilidades de composição das espécies, sendo construídos utilizando os princípios dos consórcios de plantas ou da rotação de culturas, exigindo escolha adequada de plantas para compor os sistemas (Figueiredo *et al.*, 2025).

Nesse contexto, leguminosas são muito utilizadas em sistemas agroflorestais, tendo em vista que, a maioria, dessas plantas apresenta alto valor nutritivo e possui capacidade de fixar N₂, por meio de associações simbióticas com bactérias, reduzindo custos com fertilizantes nitrogenados e proporcionando oferta de forragem com alto teor de proteína (Apolinário *et al.*, 2015; Dubeux Junior *et al.*, 2017; Figueiredo *et al.*, 2025). Dentre estas, a sabiá (*Mimosa caesalpinifolia* Benth.), leguminosa nativa do Nordeste do Brasil, se destaca por sua adaptação a diferentes condições climáticas, principalmente regiões semiáridas e tropicais úmidas, apresenta rápido crescimento, alta capacidade de regeneração, resistência ao período de estiagem, capacidade de fixação de N, produção de madeira, restauração de áreas degradadas, uso na alimentação animal e, devido a sua

rusticidade é uma alternativa para compor agroflorestas (Figueiredo *et al.*, 2025; Herrera *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2019).

Adicionalmente, a palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.), também é excelente alternativa em sistemas agroflorestais, originária do México, importante para alimentação animal, servindo como fonte energética e hídrica, especialmente na região semiárida, por conta da sua rusticidade e adaptação ao clima da região, elevada produção de fitomassa, alto valor energético, sendo uma alternativa promissora para o cultivo em consórcio, diversificando e aumentando a produção de alimentos (Almeida *et al.*, 2019; Jardim *et al.*, 2020). Alguns estudos relataram impactos positivos das leguminosas consorciadas com a palma forrageira e o potencial da sabiá no aumento da concentração de N do solo, como por exemplo, Camelo *et al.* (2021), investigando o efeito do consórcio entre a palma forrageira e leguminosas (*Gliricidia sepium* e *Leucaena leucocephala*) no Semiárido pernambucano, verificaram favorecimento na microbiota do solo com a presença das leguminosas, com aumentos de até 147,41 e 42,85 mg kg⁻¹, para Cmic e Nmic, respectivamente. Pessoa *et al.* (2025), trabalhando com consórcio da *M. caesalpiniifolia* e *Urochloa decumbens* Stapf. e monocultivo dessas espécies, observaram que a inclusão de sabiá no sistema aumentou os teores e estoques de N do solo em 30 e 35%, em comparação com o monocultivo da gramínea.

Contudo, apesar dos benefícios desses sistemas, incluindo a sabiá e a palma forrageira, poucos são os estudos que avaliaram essas espécies em consórcio na região semiárida. Com isso, torna-se necessário compreender os impactos da utilização de leguminosas arbóreas fixadoras de N consorciadas com a palma forrageira, sendo crucial para práticas mais conservacionistas e sustentáveis no manejo e conservação do solo, notadamente em ambientes semiáridos. Portanto, a hipótese dessa pesquisa é que o uso de sabiá em consórcio com a palma forrageira favorece a microbiota e aumenta os estoques de C e N do solo. Assim, objetivou-se avaliar os estoques de C e N e a biomassa microbiana do solo, em um sistema agroflorestal composto por sabiá e palma consorciadas e em monocultivo em ambiente semiárido.

2. METODOLOGIA

Descrição da área de estudo

A pesquisa foi conduzida na área experimental da Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), em Serra Talhada, Pernambuco, região Nordeste do Brasil (7°57'01" S; 38°17'53" W; 523 m de

altitude) (Figura 1). O município apresenta clima do tipo BSh, de acordo com a classificação de Köppen, com estação chuvosa durante o verão, com início em novembro e finalizando em abril (Caraciolo *et al.*, 2024), precipitação pluvial anual de 632,2 mm, temperatura média do ar de 26 °C e umidade relativa do ar de 60% (Lucena *et al.*, 2020).

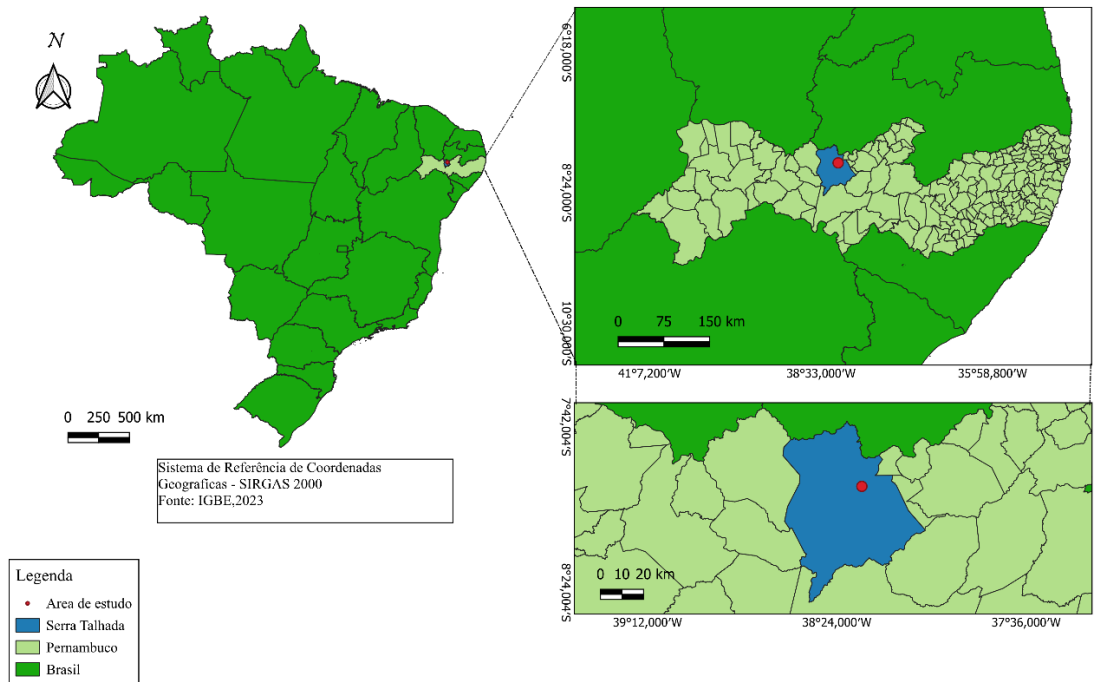


Figura 1. Mapa de localização da área experimental.

A área experimental possui relevo plano e solo classificado como Cambissolo Ta Háplico Eutrófico típico (Alves *et al.*, 2026), segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.*, 2018), e apresentou as seguintes características físico-químicas na camada de 0-40 cm descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do solo da área experimental. Serra Talhada, PE

Atributos físicos													
Camada	DS	DP	PT	NA	GF	AT	AG	AF	Silte	Argila			
Cm	cmol _c .dm ⁻³	----- % -----				----- Composição granulométrica % -							
0 - 20	1,61	2,53	36,26	4,32	59,00	73,60	44,50	29,10	15,90	10,50			
20 – 40	1,66	2,47	32,40	4,39	58,31	72,20	48,88	23,34	17,20	10,50			
Atributos químicos													
Camada	P	K	Na	RAS	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V	PST	MO	
cm	mgdm ³	pH	----- cmol _c .dm ⁻³ -----				----- % -----						
0 - 20	380	7,1	0,88	0,11	0,14	1,20	0,10	1,0	2,29	3,29	69,60	3,34	1,24
20 – 40	380	7,1	0,68	0,27	0,30	1,30	0,30	1,0	2,55	2,55	71,80	7,60	0,88

DS – Densidade do solo; DP – Densidade de partícula; PT – Porosidade total; NA – Areia natural; GF – Grau de floculação; AT – Areia total; AG – Areia Grossa; AF – Areia fina; RAS – razão de adsorção de sódio = $Na^+ / [(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2]^{1/2}$; SB – Soma de base =

$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+} + \text{Na}^{+}$; CTC – Capacidade de troca catiônica = $\text{SB} + (\text{H}^{+} + \text{Al}^{3+})$; V – Saturação por base = $(\text{SB}/\text{CTC}) \times 100$; H+A1 – Alumínio trocável; PST – percentagem de sódio trocável = $(\text{Na}^{+}/\text{CTC}) \times 100$; M.O – matéria orgânica.

As variáveis meteorológicas foram monitoradas ao longo de todo o período experimental (abril de 2024 a setembro de 2025), por meio de uma Estação Meteorológica Automática, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a 100 m da área experimental (Figura 2).

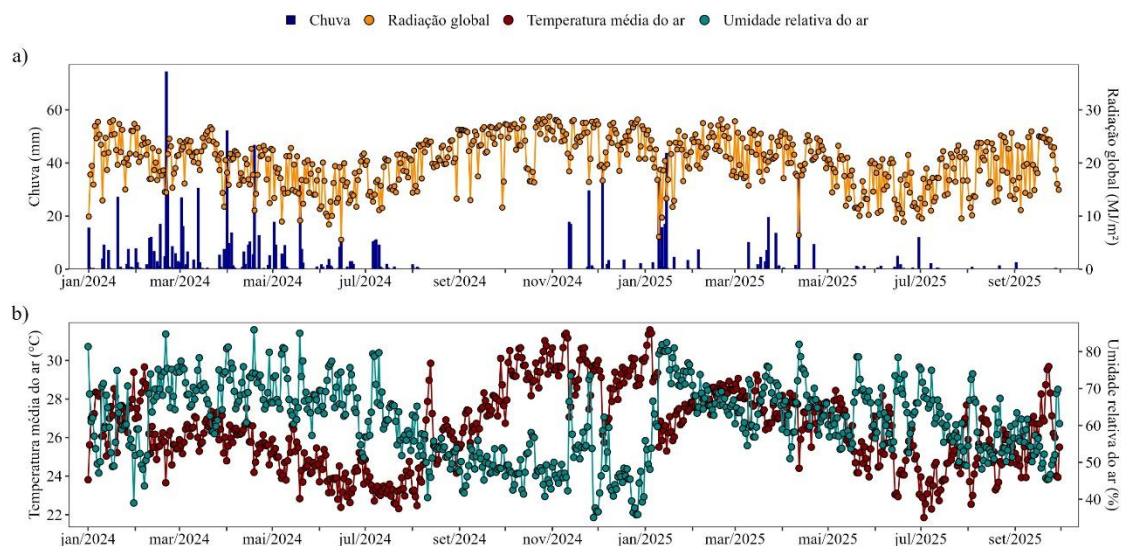


Figura 2. Chuva (mm), radiação (MJ m^{-2}), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade (%), de abril de 2024 a setembro de 2025 em Serra Talhada, Pernambuco, Brasil.

Delineamento e tratamentos experimentais

Adotou-se o delineamento em blocos casualizado (DBC) no esquema de parcela subdividida 3x2, sendo as parcelas consideradas os três sistemas de cultivo (monocultivo de palma forrageira (clone Orelha de Elefante Mexicana, *Opuntia stricta* (Haw) Haw.), e de sabiá (*M. caesalpiniifolia*) e, consórcio entre palma e sabiá), com cinco blocos, e as subparcelas foram dois diferentes períodos de avaliação (12 e 18 meses após implantação do experimento).

As parcelas com monocultivo da leguminosa foram compostas por três fileiras de plantas, com cinco plantas por fileira, com espaçamento de 3,0 m entre linhas e 1,0 m entre plantas, correspondendo a uma densidade populacional de 3.333 plantas ha^{-1} . No monocultivo da palma, utilizou-se fileiras duplas, o espaçamento adotado foi de 2,70m entre fileira dupla, 0,3m de entre fileira e 0,2 m entre plantas, com 60 plantas por fileira, perfazendo 120 plantas por unidade experimental, correspondendo a uma densidade populacional de 33.333 plantas ha^{-1} . No consórcio sabiá-palma, o arranjo foi implantado com uma fileira dupla de palma forrageira na entrelinha de duas fileiras de sabiá (3.333 plantas de sabiá ha^{-1} + 33.333 plantas de palma ha^{-1}).

Procedimentos experimentais e análises

O experimento foi implantado em abril de 2024, com transplântio de mudas de sabiá, após 90 dias do semeio. Simultaneamente, foi realizado o plantio de cladódios da palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana (OEM, *Opuntia stricta* (Haw.) Haw.). Após um ano, foram coletadas amostras de solo utilizando um trado holandês em dois períodos distintos: 12 e 18 meses após o plantio das espécies, em duas diferentes camadas (0-20 e 20-40 cm), sendo três amostras simples em cada profundidade entre as linhas de plantio, e reunidas em amostras compostas, em cada parcela experimental.

Para realização das análises, as amostras foram secas ao ar, homogeneizadas e passadas por peneiras de 2 mm. Subamostras foram separadas e passadas por peneiras de 60 e 100 mesh, para determinações de carbono orgânico total (C) e nitrogênio total (N). O C foi medido por oxidação úmida da matéria orgânica usando uma solução de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em meio ácido, e uma fonte externa de calor (Yeomans; Bremner, 1988). O N foi obtido por digestão ácida com o ácido sulfúrico, seguida da destilação e titulação (método Kjeldahl) (Teixeira *et al.*, 2017).

Determinou-se a densidade do solo, através do método do cilindro volumétrico (Teixeira *et al.*, 2017). Os estoques de C e N do solo foram calculados a partir das concentrações de C e N, densidade do solo e camadas do solo (Eq. 1), seguindo a metodologia de (Bernoux *et al.*, 2002).

$$E = Ds \times A \times T$$

Onde: E = estoques de C ou N do solo ($Mg\ ha^{-1}$); Ds = densidade do solo ($g\ cm^{-3}$); A = camada do solo (cm); e T = concentração de C ou N do solo ($g\ kg^{-1}$).

A respiração basal do solo (RBS) foi avaliada quantificando o C-CO₂ liberado pela respiração microbiana, de acordo com a metodologia de Mendonça; Matos, (2005). O carbono da biomassa microbiana (Cmic) foi determinado pelo método de irradiação-extração (Islam; Weil, 1998). O quociente metabólico (qCO₂) foi calculado pela razão entre RBS e Cmic (Anderson; Domsch, 1993), e o quociente microbiano (qMIC) foi obtido pela razão entre Cmic e C total.

Análise estatística

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (teste de Shapiro-Wilk, a 5% de probabilidade), homogeneidade (teste de Oneillmathews, a 5% de probabilidade) e à análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$) para cada camada de solo, nos diferentes períodos de amostragem para os três sistemas de cultivo. Se significativas, as médias foram submetidas ao teste de Tukey ($p < 0,05$). Foi realizado análise multivariada de

componentes principais (PCA). Para todas as análises estatísticas, utilizou-se o software R na versão 4.5.0.

3. RESULTADOS

Para os indicadores microbiológicos, observou-se que o sistema de cultivo influenciou apenas no qCO_2 na camada de 20-40 cm, quando avaliado após 12 meses ($p = 0,0257$). No entanto, houve diferença significativa na camada de 0-20 cm nos parâmetros Cmic ($p = 0,0369$); qMIC (0,0424), e 20-40 cm para Cmic ($p = 0,0485$); qMIC ($p = 0,0417$); qCO_2 ($p = 0,0257$), nos diferentes períodos de amostragem (Tabela 2).

Tabela 2. Respiração basal do solo (RBS), carbono da biomassa microbiana (Cmic), quociente microbiano (qMIC) e quociente metabólico (qCO_2) em área com diferentes sistemas de cultivo e períodos de avaliação.

Sistema de cultivo	Períodos de avaliação							
	12 meses				18 meses			
	RBS $\mu gCO_2 g^{-1} dia^{-1}$	Cmic $mg.kg^{-1}$	qMIC %	qCO_2 $\mu gC-CO_2 g^{-1} Cmic dia^{-1}$	RBS $\mu gCO_2 g^{-1} dia^{-1}$	Cmic $mg.kg^{-1}$	qMIC %	qCO_2 $\mu gC-CO_2 g^{-1} Cmic dia^{-1}$
0-20 cm								
Palma	34,50	129,55 B	9,51 B	0,24	74,73	283,64 A	21,14 A	0,27
Sabiá	39,67	231,82	16,69	0,19	73,89	263,18	19,51	0,26
Agrofloresta	50,57	227,73	16,76	0,26	73,75	175,91	13,16	0,39
p-valor	0,7926	0,0369	0,0424	0,4394	0,7926	0,0369	0,0424	0,4394
20-40 cm								
Palma	64,67	118,64	8,49	0,67 ab	83,53	118,36	8,85	0,81
Sabiá	63,70	177,27	12,61	0,37 b	76,55	132,27	9,62	0,79
Agrofloresta	70,26	84,54 B	6,01B	1,22 Aa	85,21	216,82 A	15,95 A	0,50 B
p-valor	0,9515	0,0485	0,0417	0,0257	0,9515	0,0485	0,0417	0,0257

Médias seguidas por letras maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas, diferem entre si ($p < 0,05$) de acordo com o teste de Tukey. Monocultivo de Palma = *Opuntia stricta* (Haw.) Haw.; Monocultivo de Sabiá = *Mimosa caesalpinifolia* Benth.; Sistema agroflorestal = *Opuntia stricta* (Haw.) Haw. + *Mimosa caesalpinifolia* Benth.

O sistema agroflorestal teve a maior média de qCO_2 com $1,22 \mu gC-CO_2 g^{-1} Cmic dia^{-1}$, no entanto, não diferiu do monocultivo da palma. Já para os períodos avaliados, verificou-se aumento de Cmic ($154,09 mg kg^{-1}$) e qMIC (11,63%) na camada 0-20cm no cultivo de palma e, na agrofloresta observou-se aumento de Cmic ($132,28 mg kg^{-1}$) e qMIC (9,94%) e diminuição de qCO_2 ($0,72 \mu gC-CO_2 g^{-1} Cmic dia^{-1}$) na camada de 20-40cm do período de 12 para 18 meses após o cultivo, respectivamente.

Os diferentes sistemas de cultivo não afetaram a densidade do solo, concentrações e estoques de N e C, independentemente da camada (Tabela 3).

Tabela 3. Densidade do solo (Ds), concentrações e estoques de nitrogênio (N) e carbono (C) em áreas de diferentes sistemas de cultivo em ambiente semiárido.

Sistema de cultivo	Ds	N		C	
		Concentração	Estoque	Concentração	Estoque
	g cm ⁻³	g kg ⁻¹	Mg ha ⁻¹	g kg ⁻¹	Mg ha ⁻¹
			0-20 cm		
Palma	1,39	0,16	0,44	14,31	39,55
Sabiá	1,35	0,20	0,56	13,57	36,80
Agrofloresta	1,39	0,20	0,57	14,25	38,82
p-valor	0,8133	0,0428	0,0977	0,7882	0,5972
			20-40 cm		
Palma	1,44	0,15	0,42	12,37	35,78
Sabiá	1,50	0,13	0,38	11,34	34,01
Agrofloresta	1,37	0,15	0,39	12,43	34,18
p-valor	0.5588	0.1507	0.6911	0.6745	0.9491

Médias seguidas por letras maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas, diferem entre si ($p < 0,05$) de acordo com o teste de Tukey. Monocultivo de Palma = *Opuntia stricta* (Haw.) Haw.; Monocultivo de Sabiá = *Mimosa caesalpinifolia* Benth.; Sistema agroflorestal = *Opuntia stricta* (Haw.) Haw. + *Mimosa caesalpinifolia* Benth.

Nos períodos de amostragem avaliados, houve efeito significativo apenas para a camada de 20-40 cm para a densidade do solo ($p = 0,0415$), os estoques de N ($p = 0,0024$) e de C ($p = 0,0072$), além da concentração de C do solo ($p = 0,0120$) (Tabela 4).

Tabela 4. Densidade do solo (Ds), concentrações e estoques de nitrogênio (N) e carbono (C) em áreas de diferentes sistemas de cultivo, com avaliação em dois períodos.

Período	Ds	N		C	
		Concentração	Estoque	Concentração	Estoque
	g cm ⁻³	g kg ⁻¹	Mg ha ⁻¹	g kg ⁻¹	Mg ha ⁻¹
			0-20 cm		
12 meses	1,39	0,21	0,59	13,39	37,12
18 meses	1,37	0,16	0,45	14,70	39,66
p-valor	0,7613	0,0955	0,0759	0,1496	0,2753
			20-40 cm		
12 meses	1,32B	0,13	0,32B	10,06B	25,93B
18 meses	1,55A	0,15	0,47A	14,03A	43,38A
p-valor	0.0415	0.1347	0.0024	0.0120	0.0072

Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes nas linhas diferem entre si ($p < 0,05$) de acordo com o teste Tukey.

Observou-se que na camada subsuperficial do solo, houve um aumento de (14%) na densidade do solo, nos estoques de N (32%), de C (40%) e na concentração de C (28%) do período de 12 para 18 meses de avaliação após implantação (Tabela 4).

A análise de componentes principais (PCA) explicou que 73,8% da variação total dos dados em função dos sistemas de cultivo em diferentes períodos de avaliação por meio de dois componentes principais, componente 1 (PC1) representando 49,7% e componente 2 (PC2) 24,1% (Figura 3).

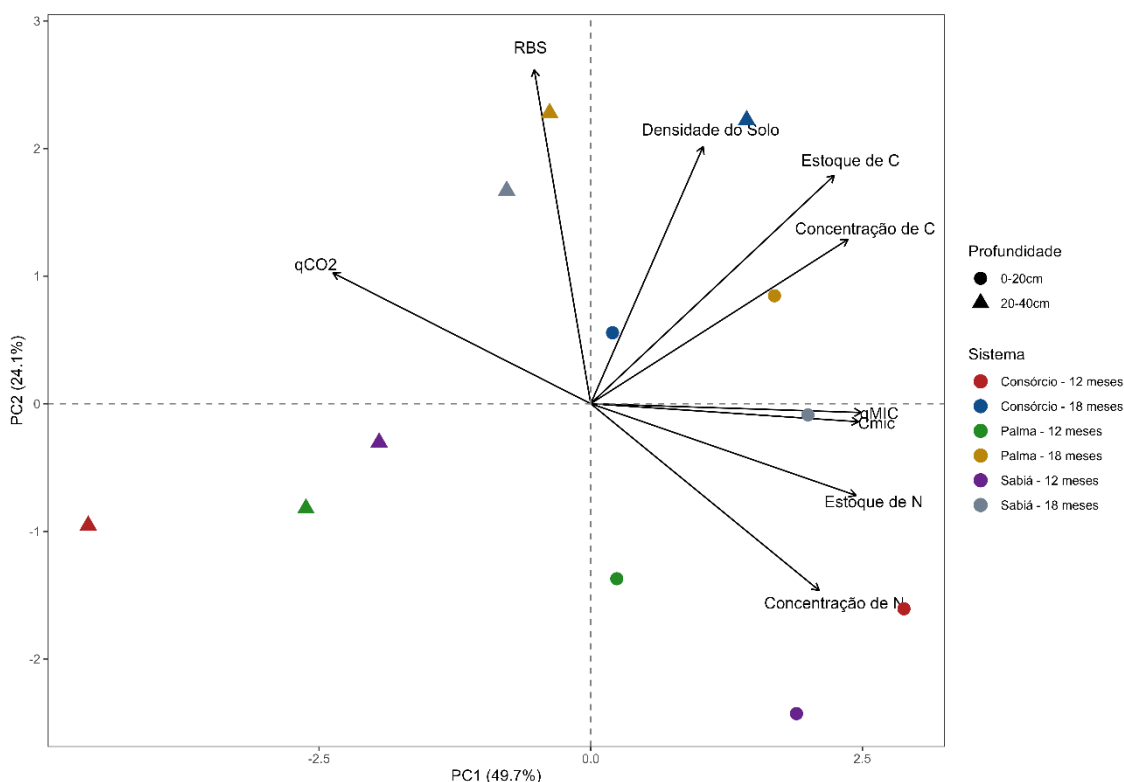


Figura 3. Análise de componentes principais (PCA) dos diferentes sistemas de cultivo (Consórcio, monocultivo de palma e monocultivo de sabiá) avaliados após 12 e 18 meses de implantação, na profundidade de 0-20cm e 20-40cm, entre os parâmetros carbono da biomassa microbiana (Cmic), quociente microbiano (qMIC), respiração basal do solo (RBS), quociente metabólico (qCO₂), densidade do solo, concentrações e estoques de N e C.

Verificou-se que Cmic, qMIC, concentração e estoque de N se correlacionaram positivamente entre si, assim como a densidade do solo, concentração e estoque de C. Já a RBS e qCO₂ foram correlacionadas negativamente com as demais variáveis estudadas. Vale destacar, que todos os parâmetros que tiveram correlação positiva, foram correlacionadas na camada amostrada de 0-20 cm de profundidade do solo. Na camada de 20-40 cm, a maioria dos tratamentos tiveram correlação negativa, sobretudo, o sistema composto pelo consórcio entre a palma + sabiá, que correlacionou com a densidade do solo, indicando que esse sistema pode ter influenciado neste parâmetro para essa profundidade.

4. DISCUSSÃO

A implantação de agroflorestas têm como principais objetivos a possibilidade de aumentar o armazenamento de carbono do solo, fixação de N, maior atividade microbiana do solo, e consequentemente, redução nas emissões de GEE (Ferreiro-Domínguez *et al.*, 2022; Pessoa *et al.*, 2025). Os sistemas de cultivo estudados foram recentemente

implantados (aproximadamente 1,5 anos), isso supostamente explica a ausência de diferença dos tratamentos na maioria dos parâmetros avaliados, quando comparado o cultivo consorciado palma-sabiá com o monocultivo dessas espécies. Os sistemas apresentaram baixos valores de quocientes metabólicos. Isso indica que há um baixo gasto energético ao usar o carbono orgânico disponível, o que pode ser atribuído às condições climáticas da região, que favorece a rápida degradação da matéria orgânica (Camelo *et al.*, 2021). Baixos valores de qCO_2 refletem ambiente mais estável ou mais próximo do seu estado de equilíbrio e, ao contrário, valores elevados são indicativos de perturbação do ecossistema ou estresse ambiental (Pessoa *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2025). No presente estudo, o qCO_2 variou de 0,19 a 1,22 $\mu gC-CO_2 g^{-1} Cmic\ dia^{-1}$ em todos os sistemas, indicando que os sistemas avaliados estavam próximos ao seu estado de equilíbrio.

No sistema agroflorestal, foi observado diminuição do $Cmic$ e $qMIC$, na profundidade de 0-20 cm, de 12 para os 18 meses após o plantio, ao contrário do que foi verificado na camada 20-40 cm, que teve um aumento desses parâmetros nesse período (Tabela 2). Isso ocorre devido ao sistema radicular da leguminosa chegar a camadas mais profundas do solo, melhorando a estrutura do solo (Lima *et al.*, 2018), criando um microclima que aumenta a diversidade microbiana (Barros *et al.*, 2021), promovendo um ambiente favorável ao crescimento microbiano em profundidade. O sistema de monocultura da palma apresentou maior $Cmic$ e $qMIC$ aos 18 meses de implantação do sistema na camada superficial do solo, enquanto que os maiores valores desses bioindicadores no perfil mais profundo do solo foi obtido do consórcio entre a palma forrageira e a sabiá, o que pode ter sido causado pelo sistema radicular desenvolvido superficialmente da cactácea, assim como o desenvolvimento radicular mais profundo da *M. caesalpiniiifolia*, fornecendo matéria orgânica, preservando a umidade, proporcionando melhores condições microbiológicas do solo. Os valores encontrados no sistema agroflorestal são semelhantes aos observados por Camelo *et al.*, (2021), que avaliaram diferentes sistemas de cultivo e observaram que a inclusão de leguminosas arbóreas no sistema favoreceu o desenvolvimento de uma população microbiana mais estável.

Embora o sistema de cultivo não tenha apresentado diferença significativa, a inclusão da leguminosa pode ter influenciado para o aumento no estoque de N na camada subsuperficial do solo nos períodos avaliados, devido as suas raízes mais aprofundadas. De acordo com Apolinário *et al.* (2016), o aumento de N no solo, se dá pela fixação

biológica promovida pela leguminosa em sistemas agroflorestais. *M. caesalpiniiifolia* forma associações simbióticas e não simbióticas com vários tipos de bactérias fixadoras e se beneficia do fornecimento eficiente de N por meio da fixação biológica de nitrogênio (Maia *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2019). O aumento de N ao longo do tempo e após a estação chuvosa, pode ser explicado pelo maior depósito de serrapilheira, em função da caducifolia da leguminosa arbórea, comum nessa época do ano, como mecanismo para minimizar a perda de água por evapotranspiração, essa espécie geralmente perde suas folhas no final da estação chuvosa e durante a estação seca (Camelo *et al.*, 2021).

Por apresentar raízes principais, as leguminosas arbóreas podem aumentar os estoques de N nas camadas mais profundas do solo (Pessoa *et al.*, 2025), especialmente quando avaliados ao longo do tempo. O aumento de N em uma profundidade maior do solo, provavelmente esteve associado a fixação de N da leguminosa, e à decomposição das raízes e nódulos (Thilakarathna *et al.*, 2016). Os valores observados corroboram os obtidos por Pessoa *et al.*, (2025), que avaliaram o sistema silvipastoril composto por sabiá e gramínea durante três anos e verificaram que houve aumento geral dos estoques de N ao longo do tempo, possivelmente proporcionado por *M. caesalpiniiifolia*, tanto em monocultivo quanto no sistema silvipastoril. Árvores leguminosas em sistemas agroflorestais têm potencial de melhorar a qualidade do solo, promover uma melhor exploração do solo pela combinação de diferentes sistemas radiculares, resultando em maior massa radicular, consequentemente, aumentando o teor de matéria orgânica nas camadas superiores do solo, e nas camadas mais profundas o aumento da matéria orgânica advém das leguminosas arbóreas (Dubeux Junior *et al.*, 2017; Pessoa *et al.*, 2025). Vale destacar que sistemas agroflorestais podem ampliar a exploração do solo pela combinação de diferentes sistemas radiculares, podendo resultar em maior massa radicular e matéria orgânica nas camadas superiores do solo e o aumento da matéria orgânica nas camadas mais profundas proporcionado pelas árvores leguminosas (Haile; Nair; Nair, 2010; Kumar; Udawatta; Anderson, 2010).

A concentração e estoque de C aumentaram significativamente aos 18 meses do plantio na camada de 20-40 cm de profundidade, com aumento de $1,98 \text{ g kg}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $8,72 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente. Os valores obtidos no presente estudo são inferiores para a concentração, mas é superior para o estoque de C ao que foi verificado por Lira Junior *et al.*, (2020), que avaliando sistemas silvopastoris por quatro anos, identificaram que a utilização da *M. caesalpiniiifolia* proporcionou um aumento de aproximadamente $6 \text{ g kg}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na concentração e $7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no estoque de C, na mesma profundidade deste

estudo. O menor incremento na concentração de C para este estudo, pode estar relacionado ao período de avaliação após implantação dos sistemas de apenas 1 e 1,5 anos, quando comparado com o trabalho desenvolvido por Lira Junior et al., (2020), que foi avaliado após 2 e 4 anos. Os valores de C deste estudo são considerados iguais estatisticamente para os diferentes sistemas, não diferindo o monocultivo do sistema agroflorestal. Corroborando os resultados obtidos por González et al., (2018), que trabalhando com áreas de cultivo de palma e milho e, áreas de floresta, verificaram que solos cultivados apenas com a palma forrageira possuem níveis de C semelhantes às áreas de vegetação nativa. Entretanto, vale ressaltar que os sistemas agroflorestais permitem melhor cobertura do solo, através da serrapilheira das árvores (Camelo *et al.*, 2021).

A densidade do solo teve um aumento significativo de 1,32 para 1,55 g cm⁻³, nos períodos avaliados. Esse valor maior na densidade para esse período, pode estar associado a falta de chuva na área no período de amostragem (Figura 2), esse decréscimo de água pode ter reduzido o crescimento e a penetração das raízes no solo (Pessoa *et al.*, 2025). Geralmente, solos compactados e pesados proporcionam menor crescimento das raízes e diminuição da aeração do solo (Shah *et al.*, 2017). Os diferentes sistemas não afetaram a densidade do solo, porém, a leguminosa proporcionou média menor para densidade do solo, sobretudo na camada do solo de 20-40 cm. Resultado semelhante ao Lima et al., (2018), que avaliando atributos do solo de um sistema silvipastoril, observaram menor densidade do solo em áreas que incluíam as leguminosas.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo indicam que o sistema agroflorestal e até mesmo o monocultivo da palma ou utilizando apenas árvores leguminosas de *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. não causou perturbação ao solo (qMIC e qCO₂). A inclusão das leguminosas arbóreas pode ter levado a aumentos na concentração de C e estoques de N e C na camada subsuperficial do solo, após 1,5 anos do plantio dos sistemas. Contudo, estudos adicionais tornam-se necessários em um período de tempo maior, pois é importante monitorar possíveis impactos a longo prazo, como mudanças na estrutura do solo ou competição entre as espécies com o amadurecimento do sistema.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, H. A. de *et al.* Social and Productive Indicators of Forage Palm and the Survival of Livestock Activity in the Semi-arid Region of Northeastern Brazil. **Asian Journal of Advances in Agricultural Research**, p. 1–12, 2019.
- ALVES, C. P. *et al.* Enhancing water management and natural resource use in tropical grassland systems under semi-arid conditions: Dual Kc approach. *Biomass and Bioenergy*, vol. 208, 2026.
- ANDERSON, T.-H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biol. Biochem.** 1993.
- APOLINÁRIO, V. X. de O. *et al.* Arboreal legume litter nutrient contribution to a tropical silvopasture. **Agronomy Journal**, vol. 108, nº 6, p. 2478–2484, 2016.
- APOLINÁRIO, V. X. O. *et al.* Tree legumes provide marketable wood and add nitrogen in warm-climate silvopasture systems. **Agronomy Journal**, vol. 107, nº 5, p. 1915–1921, 2015.
- BARROS, F. M. do R. *et al.* Spatial and seasonal responses of diazotrophs and ammonium-oxidizing bacteria to legume-based silvopastoral systems. **Applied Soil Ecology**, vol. 158, 2021.
- BERNOUX, M. *et al.* Brazil's Soil Carbon Stocks. **Soil Science Society of America Journal**, vol. 66, nº 3, p. 888–896, 2002.
- CAMELO, D. *et al.* Soil microbial activity and biomass in semiarid agroforestry systems integrating forage cactus and tree legumes. **Agronomy**, vol. 11, nº 8, 2021.
- CARACIOLO, J. P. S. *et al.* Lifetime of forage cactus submitted to different water and saline levels. **Acta Scientiarum - Technology**, vol. 46, nº 1, 2024.
- CHALISE, D.; KUMAR, L.; KRISTIANSEN, P. Land degradation by soil erosion in Nepal: A review. **MDPI AG**, 2019.
- COELHO, D. de L. *et al.* Can silvopasture with arboreal legumes increase root mass at deeper soil layers and improve soil aggregation? **Soil Science Society of America Journal**, 2024.
- DUBEUX JUNIOR, J. C. B. *et al.* Tree legumes: An underexploited resource in warm-climate silvopastures. **Sociedade Brasileira de Zootecnia**, 2017.
- FAHAD, S. *et al.* Agroforestry Systems for Soil Health Improvement and Maintenance. **MDPI**, 2022.
- FERREIRO-DOMÍNGUEZ, N. *et al.* Climate Change and Silvopasture: The Potential of the Tree and Weather to Modify Soil Carbon Balance. **Sustainability (Switzerland)**, vol. 14, nº 7, 2022.
- FIGUEIREDO, T. L. *et al.* Urea fertilization reduced biological N₂ fixation but did not impact the development of legume trees in an agroforestry system. **Plant and Soil**, 2025.

- GONZÁLEZ, F. de L. *et al.* Cactus crop as an option to reduce soil C–CO₂ emissions in soils with declining fertility. **Agronomy for Sustainable Development**, vol. 38, nº 1, 2018.
- HAILE, S. G.; NAIR, V. D.; NAIR, P. K. R. Contribution of trees to carbon storage in soils of silvopastoral systems in Florida, USA. **Global Change Biology**, vol. 16, nº 1, p. 427–438, 2010.
- HERRERA, A. M. *et al.* Potential of *Gliricidia sepium* (jacq.) Kunth ex Walp. and *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. in silvopastoral systems intercropped with signalgrass [*Urochloa decumbens* (Stapf) R.D. Webster]. **Agroforestry Systems**, vol. 95, nº 6, p. 1061–1072, 2021.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon Biol Fertil Soils. **Springer-Verlag**, 1998.
- JARDIM, A. M. da R. F. *et al.* Interação de agroecossistema consorciado com palma-sorgo em ambiente semiárido: uma revisão. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, vol. 5, nº 1, p. 069–087, 2020.
- KOOCH, Y. *et al.* Soil health reduction following the conversion of primary vegetation covers. **Science of The Total Environment**, vol. 921, 2024.
- KUMAR, S.; UDAWATTA, R. P.; ANDERSON, S. H. Root length density and carbon content of agroforestry and grass buffers under grazed pasture systems in a Hapludalf. **Agroforestry Systems**, vol. 80, nº 1, p. 85–96, 2010.
- LIMA, H. B. *et al.* Soil attributes of a silvopastoral system in Pernambuco Forest Zone. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, vol. 6, p. 15–25, 2018.
- LIRA JUNIOR, M. A. *et al.* Legume-based silvopastoral systems drive C and N soil stocks in a subhumid tropical environment. **Catena**, vol. 189, 2020.
- LUCENA, L. R. R. de *et al.* Estimating the area and weight of cactus forage cladodes using linear dimensions. **Acta Scientiarum - Agronomy**, vol. 43, p. 1–10, 2020.
- MAIA, E. P. V. *et al.* Co-inoculation of *Rhizobium* and Arbuscular Mycorrhiza Increases *Mimosa caesalpiniaefolia* Growth in Soil Degraded by Manganese Mining. **Water, Air, and Soil Pollution**, vol. 234, nº 5, 2023.
- MARSDEN, C. *et al.* How agroforestry systems influence soil fauna and their functions - a review. **Plant and Soil**, vol. 453, nº 1–2, p. 29–44, 2020.
- MENDONÇA, E. de S.; MATOS, E. da S. Matéria orgânica do solo: métodos de análises. Viçosa: **UFV**, 2005.
- NTAWURUHUNGA, D. *et al.* Climate-smart agroforestry systems and practices A systematic review of what works, what doesn't work, and why. **Forest Policy and Economics**, nº 150, p. 102937, 2023.
- OLIVEIRA, I. S. R. de *et al.* *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. adapts to rhizobia populations with differential taxonomy and symbiotic effectiveness outside of its location of origin. **FEMS Microbiology Ecology**, vol. 95, nº 8, 2019.

- PESSOA, D. V. *et al.* Legume trees in an established tropical grass pasture increase deep-soil N stocks. **European Journal of Agronomy**, vol. 164, 2025.
- SANTOS, H. G. dos *et al.* Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. **Embrapa**, p. 356, 2018.
- SHAH, A. N. *et al.* Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. **Environmental Science and Pollution Research**, vol. 24, nº 11, p. 10056–10067, 2017.
- SHAO, W. *et al.* Comprehensive assessment of land degradation in the arid and semiarid area based on the optimal land degradation index model. **Catena**, 2024.
- SILVA, R. R. da *et al.* Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica campos das vertentes - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 34, p. 1584–1592, 2010.
- SOUZA, P. A. dos S. *et al.* Microbial biomass, carbon and nitrogen stocks across land uses and soil types in the Brazilian tropical dry forest region. **Journal of Arid Environments**, vol. 229, 2025.
- TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br>.
- THILAKARATHNA, M. S. *et al.* Belowground nitrogen transfer from legumes to non-legumes under managed herbaceous cropping systems. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, vol. 36, nº 4, 2016.
- 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**, vol. 19, nº 13, p. 1467–1476, 1988.