



**JOÃO MARCELO SOUSA DINIZ**

**ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO EM  
SISTEMAS AGROFLORESTAIS E EM SISTEMAS DE  
PASTAGEM EM MONOCULTIVO**

**LAVRAS-MG  
2025**

**JOÃO MARCELO SOUSA DINIZ**

**ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO EM SISTEMAS  
AGROFLORESTAIS E EM SISTEMAS DE PASTAGEM EM MONOCULTIVO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Produção Animal, área de concentração em Ciências Agrárias, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador  
Prof. Dr. Daniel Rume Casagrande

**LAVRAS-MG  
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA,  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Diniz, João Marcelo Sousa.

Estoques de carbono e nitrogênio no solo em sistemas  
agroflorestais e em sistemas de pastagem em monocultivo / João  
Marcelo Sousa Diniz. – 2024

52 p. : il.

Orientador: Daniel Rume Casagrande.

Dissertação (Mestrado profissional) – Universidade Federal de  
Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Estoque de Carbono no Solo. 2. Estoque de Nitrogênio no  
Solo. 3. Sistemas Agroflorestais. I. Casagrande, Daniel Rume. II.  
Título.

**JOÃO MARCELO SOUSA DINIZ**

**ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO EM SISTEMAS  
AGROFLORESTAIS E EM SISTEMAS DE PASTAGEM EM MONOCULTIVO**

**SOIL CARBON AND NITROGEN STOCKS IN AGROFORESTRY AND MONOCUL  
TURE PASTURE SYSTEMS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Produção Animal, área de concentração em Ciências Agrárias, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 29 de agosto de 2024.

Dr. Daniel Rume Casagrande UFLA

Dr. Márcio André Stefanelli Lara UFLA

Dr. Bruno Grossi Costa Homem UFV

Orientador

Prof: Dr. Daniel Rume Casagrande

**LAVRAS-MG  
2025**

*À todos os agricultores e pecuaristas brasileiros  
que se empenham em transformar a realidade ambiental  
dos ecossistemas terrestres, principalmente àqueles que  
buscam a sustentabilidade através da implantação de  
sistemas agroflorestais.*

*Dedico.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) e todos os parceiros envolvidos, pela iniciativa de criação do Projeto Rural Sustentável (PRS-Cerrado), por terem convidado a Fazenda Mangalô a ser uma Unidade Demonstrativa do projeto, promovendo pesquisas científicas relevantes para as ciências agrárias e me incentivando a ingressar em um programa de mestrado profissional.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), especialmente aos coordenadores e professores dos Programas de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Produção Animal (PPGCTPA) e Desenvolvimento Sustentável (PPGDE), à Faculdade de Zootecnia e Medicina Veterinária (FZMV), e à Faculdade de Ciências Sociais Aplicadas (FCSA), pela receptividade ao convênio com o IABS e pelo compromisso com a qualidade do ensino.

Às pesquisadoras Marina Lima, Amana Obolari e Daiana Lopes da Universidade Federal de Viçosa (UFV), pelo apoio na amostragem e análises laboratoriais.

Aos técnicos do SEBRAE e da EMATER pela assistência técnica e gerencial na fazenda.

Ao professor Daniel Rume Casagrande, pela orientação, paciência e disposição para ajudar.

A todos os colegas da primeira turma do mestrado profissional do convênio UFLA/IABS.

Aos meus pais, João e Ângela pelo apoio incondicional em todas as minhas decisões nas diferentes etapas da minha vida, e às minhas irmãs Clara e Isabel, pelo carinho e amizade.

À minha avó Wilma, pela referência familiar, perseverança inigualável, e pela oportunidade abençoada de poder trabalhar e fazer meus experimentos nas terras da família em Abaeté.

Ao meu tio Toninho, pelo companheirismo, orientação, e suporte em todos os momentos desafiadores na fazenda, e ao Sr. Ilton (Nego do Gelomé), pela dedicação ao manejo do rebanho bovino.

Ao meu filho Benjamin e à minha esposa Thaís, pelo amor e paciência.

**MUITO OBRIGADO!**

*“Todo jardim começa com um sonho de amor.  
Antes que qualquer árvore seja plantada  
ou qualquer lago seja construído,  
é preciso que as árvores e os lagos  
tenham nascido dentro da alma.*

*Quem não tem jardins por dentro,  
não planta jardins por fora  
e nem passeia por eles.”*

*Rubem Alves*

## RESUMO

A agricultura e a pecuária, atividades historicamente essenciais para o desenvolvimento humano, enfrentam desafios devido ao rápido crescimento populacional e à alta demanda por alimentos. Além disso, a crescente preocupação com o aumento da temperatura global resultante da acelerada emissão de gases de efeito estufa impulsiona ainda mais a necessidade de desenvolvimento de sistemas de produção sustentáveis. No Brasil, ambas atividades contribuem significativamente para o progresso socioeconômico, mas a questão é como mantê-las produtivas sem prejudicar drasticamente os ecossistemas e seus recursos naturais. Práticas inovadoras de pecuária regenerativa e sistemas agroflorestais representam soluções para evitar a degradação de pastagens convencionais e promover a sustentabilidade ambiental. O presente trabalho pretende caracterizar um sistema agroflorestal focado em pecuária leiteira em uma propriedade no Cerrado mineiro, e avaliar os estoques de carbono e nitrogênio no solo em três diferentes tratamentos do sistema agroflorestal, sendo eles componente mombaça, componente agrícola e componente arbóreo, comparando com os estoques de C e N em pastagem degradada e pastagem manejada, sendo estes dois últimos tratamentos em sistema de monocultivo. Em cada tratamento foram coletadas três amostras simples em pontos aleatórios. Foram coletadas amostras de solo deformadas usando um trado holandês em seis profundidades (0-10; 10-20; 20-30; 30-40; 40-50; 50-100 cm). Para cada profundidade foi obtido uma amostra composta, definida a partir de 3 amostras simples coletadas. As amostras foram enviadas ao Laboratório de Análise do Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante, e ao Laboratório de Espectrometria de Absorção Atômica, ambos na Universidade Federal de Viçosa (UFV) – Departamento de Solos. Os resultados revelaram que os estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo foram significativamente maiores nas camadas superficiais da pastagem manejada como monocultivo. Nas camadas mais profundas, a diferença nos estoques de C e N entre os tratamentos foi menos evidente, sugerindo que o sistema de manejo têm uma influência mais forte nas camadas superficiais do solo, especialmente entre 0 e 20 cm de profundidade, no período de 2 a 4 anos. Para avaliar o impacto do sistema de manejo nas camadas mais profundas do solo, são necessários estudos de longo prazo, com duração superior a 20 anos.

**Palavras-chave:** estoques de carbono e nitrogênio no solo; sistemas agroflorestais; pastagem manejada.



## ABSTRACT

Agriculture and livestock farming, historically essential for human development, face challenges due to rapid population growth and high food demand. Additionally, increasing concerns about global temperature rise from accelerated greenhouse gas emissions further drive the need for the development of sustainable production systems. In Brazil, both activities significantly contribute to socioeconomic progress, but the challenge is how to maintain productivity without drastically harming ecosystems and their natural resources. Innovative practices in regenerative livestock farming and agroforestry systems offer solutions to prevent the degradation of conventional pastures and promote environmental sustainability. This study aims to characterize an agroforestry system focused on dairy farming on a property in the Brazilian Cerrado and evaluate soil carbon and nitrogen stocks in three different agroforestry treatments: Mombaça component, agricultural component, and arboreal component, comparing them with carbon (C) and nitrogen (N) stocks in degraded pasture and managed pasture, both of which are monoculture systems. Soil samples were collected using a Dutch auger at six depths (0-10; 10-20; 20-30; 30-40; 40-50; 50-100 cm), with three random simple samples taken at each treatment. Composited samples for each depth were analyzed at the Soil, Plant Tissue, and Fertilizer Analysis Laboratory and the Atomic Absorption Spectrometry Laboratory, both at the Federal University of Viçosa (UFV) – Department of Soils. Results revealed that carbon (C) and nitrogen (N) stocks in the soil were significantly higher in the surface layers of managed pasture as a monoculture. In the deeper layers, the difference in C and N stocks between treatments was less pronounced, suggesting that the management system has a stronger influence on the soil surface layers, especially between 0 and 20 cm depth, over a period of 2 to 3 years. Long-term studies extending beyond 20 years are necessary to assess the impact of the management system on deeper soil layers.

**Keywords:** soil carbon and nitrogen stocks; agroforestry systems; managed pasture.

## INDICADORES DE IMPACTO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os estoques de carbono e nitrogênio no solo em diferentes sistemas de uso da terra – três componentes de um sistema agroflorestal voltado à pecuária leiteira e dois sistemas de pastagem em monocultivo – em uma propriedade rural localizada no Cerrado de Minas Gerais. Os resultados obtidos indicaram que o manejo adequado de pastagens foi mais eficaz, no curto prazo (2 a 4 anos), para o acúmulo de C e N nas camadas superficiais do solo, enquanto os sistemas agroflorestais apresentaram maior potencial de acúmulo em camadas profundas, o que sugere contribuição relevante para o sequestro de carbono a longo prazo. Em termos sociais e extensionistas, o trabalho envolveu pesquisadores e produtores rurais, promovendo a troca de conhecimentos entre universidade e campo, fortalecendo práticas sustentáveis e produtivas. Do ponto de vista tecnológico, os sistemas agroflorestais são apresentados como alternativas sustentáveis de produção que integram árvores, agricultura e pecuária, permitindo ao mesmo tempo regeneração do solo e geração de renda. Culturalmente, o trabalho reforça a importância de reconhecer a pecuária como atividade regenerativa, quando adequadamente manejada, desconstruindo sua associação exclusiva à degradação ambiental. Economicamente, os dados obtidos revelam o potencial desses sistemas serem incluídos em iniciativas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e projetos de créditos de carbono, com impacto direto na valorização econômica de práticas que promovem conservação e produtividade. O público beneficiado inclui produtores rurais, extensionistas, pesquisadores, professores e estudantes. O trabalho se alinha às áreas temáticas de “tecnologia e produção”, “trabalho”, “meio ambiente” e “educação”, da Política Nacional de Extensão Universitária, além de contribuir para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, com destaque para os ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), 12 (Consumo e produção responsáveis), 13 (Ação contra a mudança global do clima) e 15 (Vida terrestre), promovendo uma abordagem que alia ciência, prática e impacto real sobre territórios e populações rurais. Os impactos relatados, embora ainda em estágio inicial, apresentam potencial concreto de transformação local e replicabilidade em outras regiões de características semelhantes.

## IMPACT INDICATORS

This study aimed to evaluate soil carbon and nitrogen stocks in different land use systems—three components of an agroforestry system focused on dairy cattle and two monoculture pasture systems—on a rural property located in the Cerrado biome of Minas Gerais, Brazil. The results showed that, in the short term (2 to 4 years), well-managed monoculture pastures were more effective in accumulating C and N in the surface soil layers, while the agroforestry systems exhibited greater potential for accumulation in deeper layers, indicating a relevant contribution to long-term carbon sequestration. From a social and extensionist perspective, the work involved researchers and rural producers, fostering knowledge exchange between the university and the field, and strengthening sustainable and productive practices. Technologically, agroforestry systems are presented as sustainable production alternatives that integrate trees, agriculture, and livestock, enabling both soil regeneration and income generation. Culturally, the study emphasizes the importance of recognizing livestock farming as a regenerative activity when properly managed, breaking with its exclusive association to environmental degradation. Economically, the data reveal the potential for such systems to be included in Payment for Environmental Services (PES) initiatives and carbon credit projects, directly enhancing the economic value of practices that combine conservation and productivity. The beneficiaries include rural producers, extension agents, researchers, professors, and students. The study aligns with the thematic areas of “technology and production,” “work,” “environment,” and “education” from the National University Extension Policy, and contributes to the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), especially SDG 2 (Zero Hunger and sustainable agriculture), 12 (Responsible consumption and production), 13 (Climate action), and 15 (Life on land), promoting an approach that bridges science, practice, and tangible impact on rural territories and populations. Although still in an early stage, the reported impacts demonstrate concrete potential for local transformation and replicability in other regions with similar characteristics.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Localização do município de Abaeté no mapa de Minas Gerais e no mapa do Brasil.....                                                                                                                                          | 28 |
| Figura 2 - Área de estudo, onde foram coletadas amostras nos componentes Mombaça (CM), agrícola (CA) e arbóreo ou florestal (CF) no sistema Agroflorestal (SAF), bem como em condições de pastagem manejada (PM) e degradada (PD). .... | 29 |
| Figura 3 - Preparo do solo e cultivo da abóbora japonesa no componente agrícola (CA) entre linhas do componente florestal (CF) no sistema agroflorestal. ....                                                                           | 30 |
| Figura 4 - Animais pastejando no componente mombaça (CM) do sistema agroflorestal após dois anos de implementação do sistema.....                                                                                                       | 31 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1 - Concentração de Carbono nas diferentes camadas do solo de cada tratamento. ....              | 34 |
| Gráfico 2 - Concentração de Nitrogênio nas diferentes camadas do solo de cada tratamento. ....           | 35 |
| Gráfico 3 - Estoques de carbono e nitrogênio no solo de cada tratamento em 1 metro de profundidade. .... | 36 |
| Gráfico 4 - Estoque de carbono no solo em cada tratamento em diferentes camadas de profundidade. ....    | 37 |
| Gráfico 5 - Estoque de nitrogênio em diferentes camadas de profundidade do solo. ....                    | 38 |

## LISTA DE SIGLAS

|                 |                                                                     |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------|
| CA              | Componente Agrícola                                                 |
| CAP             | Circunferência na Altura do Peito                                   |
| CF              | Componente Florestal                                                |
| CM              | Componente Mombaça                                                  |
| CO <sup>2</sup> | Dióxido de Carbono                                                  |
| CTC             | Capacidade de Troca Catiônica                                       |
| DAP             | Diâmetro na Altura do Peito                                         |
| DS              | Densidade do Solo                                                   |
| EC              | Estoque de Carbono                                                  |
| EN              | Estoque de Nitrogênio                                               |
| GEE             | Gases de efeito estufa                                              |
| IABS            | Instituto de Desenvolvimento e Sustentabilidade do Brasil           |
| IBGE            | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                     |
| ILPF            | Integração lavoura pecuária floresta                                |
| MN              | Matéria Natural                                                     |
| MONO            | Monocultivo ou monocultura                                          |
| MOS             | Matéria orgânica no solo                                            |
| MS              | Matéria Seca                                                        |
| ODS             | Objetivos de desenvolvimento sustentável                            |
| ONU             | Organização das Nações Unidas                                       |
| PTF             | Funções de Pedotransferência                                        |
| SAF             | Sistemas agroflorestais                                             |
| SASP            | Sistema agrossilvipastoril                                          |
| UFLA            | Universidade Federal de Lavras UFV – Universidade Federal de Viçosa |

## SUMÁRIO

|            |                                                            |           |
|------------|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                    | <b>15</b> |
| <b>2</b>   | <b>OBJETIVO .....</b>                                      | <b>19</b> |
| <b>3</b>   | <b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                           | <b>20</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Manejo de Pastagens .....</b>                           | <b>20</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Sistemas Agroflorestais .....</b>                       | <b>21</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Matéria Orgânica no Solo .....</b>                      | <b>22</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Estoques de Carbono e Nitrogênio no Solo .....</b>      | <b>23</b> |
| <b>3.5</b> | <b>Relação C/N.....</b>                                    | <b>26</b> |
| <b>4</b>   | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                            | <b>28</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Área de Estudo.....</b>                                 | <b>28</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Amostragem e Análise do Solo .....</b>                  | <b>31</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Cálculo dos Estoques de Carbono e Nitrogênio.....</b>   | <b>32</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Análise Estatística.....</b>                            | <b>32</b> |
| <b>5</b>   | <b>RESULTADOS .....</b>                                    | <b>34</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Concentrações de Carbono e Nitrogênio no Solo .....</b> | <b>34</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Estoques de Carbono e Nitrogênio no Solo .....</b>      | <b>35</b> |
| <b>5.3</b> | <b>Características Físicas do Solo .....</b>               | <b>38</b> |
| <b>6</b>   | <b>DISCUSSÃO .....</b>                                     | <b>40</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Efeito da Camada Amostrada .....</b>                    | <b>40</b> |
| <b>6.2</b> | <b>Efeito do Sistema de Manejo .....</b>                   | <b>41</b> |
| <b>7</b>   | <b>CONCLUSÃO.....</b>                                      | <b>43</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                   | <b>44</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A pecuária leiteira é uma das principais atividades econômicas desenvolvidas no Estado de Minas Gerais, sendo responsável pelo emprego de mais de 1,8 milhão de trabalhadores, de acordo com o censo agropecuário realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2017. Minas Gerais foi responsável pelo maior volume de leite produzido no Brasil, tendo apresentado uma produção de 8,7 bilhões de litros em 2017, o que representou um percentual de 29% em relação à produção nacional, de 30 bilhões de litros naquele ano (IBGE, 2017).

Em 2022, de acordo com a Pesquisa da Pecuária Municipal do IBGE, a produção de leite no Brasil totalizou 34,6 bilhões de litros, mas apresentou uma redução de 1,6% em relação ao ano anterior. Essa queda foi influenciada pelo aumento dos custos de produção, que levou muitos pequenos produtores a abandonar a atividade em favor do arrendamento de terras para a produção de grãos. As regiões Sul e Sudeste continuam sendo as maiores produtoras, e Minas Gerais representou 27,1% da produção nacional. Apesar da redução na quantidade produzida, o valor total da produção cresceu 17,7%, atingindo R\$80 bilhões (IBGE, 2023).

De acordo com o censo, a área destinada para o cultivo de pastagens foi de 36,2% da área agrícola total de Minas Gerais, ou seja 13,8 milhões de hectares. Para efeito de mensuração do tamanho do desafio que o setor vem enfrentando nas últimas décadas, Dias-Filho (2011) estimou que 50 a 70% das áreas de pastagens em Minas Gerais apresentavam sinais de degradação. O mesmo autor afirmou que, no Brasil, cerca de 28 milhões de hectares de pastagens apresentam sinais de degradação, e sistematizou as causas da degradação de pastagens e algumas estratégias de recuperação, incluindo sistemas de integração com lavouras (Dias-Filho, 2024).

Mas por que as pastagens são tão importantes e precisam ser recuperadas e bem manejadas? A alimentação de vacas leiteiras oriundas de rebanhos mestiços tem se baseado, principalmente, na utilização de gramíneas. Entretanto, o baixo potencial produtivo e o pobre valor nutricional da maioria das pastagens, associado ao processo de degradação, constituem uma das principais limitações na produção de bovinos leiteiros a pasto. De fato, o avanço no processo de degradação das pastagens limita o consumo de forragem e compromete o ganho de peso dos animais, o que resulta em elevada idade ao primeiro parto e diminuição dos índices de eficiência zootécnica e econômica dos sistemas de produção animal.

Além disso, a ineficiência deste modelo de produção animal tem gerado críticas associadas tanto ao desmatamento para abertura de novas fronteiras agrícolas quanto à emissão



de quantidades significativas de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, e posicionando o setor agrícola como um dos principais causadores das mudanças climáticas (Mayer *et al.*, 2022; Schembergue *et al.*, 2017). Por sua vez, as mudanças climáticas também influenciam diretamente o setor agrícola, impactando a produção e a renda dos produtores e interferindo negativamente no desenvolvimento econômico do país. Diante disso, é de fundamental importância buscar estratégias de adaptação para o setor agrícola (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, 2011; Oliveira; Prado; Monteiro, 2022).

Neste contexto, a demanda por sistemas pecuários sustentáveis, que promovam melhorias nos serviços ambientais e econômicos têm aumentado, sendo a adoção de sistemas integrados como uma alternativa promissora. Vários autores têm sugerido que uma opção para superar esses problemas é a integração de pastagens, espécies arbóreas e animais em sistemas agroflorestais, ou SAF (Garcia; Couto, 1997; Paciullo *et al.*, 2009; Sousa *et al.*, 2010). A adoção de sistemas integrados concilia diferentes tipos de vegetação na mesma área, contribuindo para a entrada de matéria orgânica no solo, promovendo o aumento e a diversificação da microbiota responsável pela decomposição. Consequentemente, isso favorece a ciclagem de nutrientes e o armazenamento de carbono no solo (Dubey *et al.*, 2019), desempenhando um papel importante em pastagens tropicais, onde o processo de degradação e as perdas de carbono no solo podem estar intimamente relacionados à dinâmica da matéria orgânica.

A presença de diferentes espécies vegetais na mesma área pode influenciar a qualidade da matéria orgânica depositada no solo e o potencial do sistema para armazenar carbono (Ramesh *et al.*, 2019). Atualmente, a implementação de sistemas integrados entre componentes forrageiros e arbóreos é caracterizada como um potencial sumidouro de carbono atmosférico. Outro fator que contribui para a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) é o volume de raízes presentes no solo. As raízes liberam exsudatos, compostos principalmente de carboidratos e ácidos orgânicos que são degradados e metabolizados em açúcares simples e aminoácidos por microrganismos do solo, atuando como uma fonte de energia prontamente disponível para a microbiota responsável pela decomposição (Whalen *et al.*, 2014). Assim, enquanto as árvores fornecem maior deposição de matéria orgânica com altas concentrações de celulose e lignina, retardando o processo de decomposição dos resíduos, os exsudatos radiculares podem promover o crescimento da microbiota responsável pela decomposição da matéria orgânica, otimizando a ciclagem de nutrientes (Mohanram; Kumar, 2019).

O acúmulo de biomassa e a ciclagem de nutrientes em pastagens de gramíneas cultivadas em monocultura podem ser restringidos pela baixa taxa de mineralização de nutrientes, especialmente o nitrogênio (Silva *et al.*, 2022). Assim, o nitrogênio se torna um

elemento chave na ciclagem de nutrientes dentro dos sistemas de produção, sendo essencial para o crescimento das forragens e a manutenção da qualidade do solo (Liu *et al.*, 2018). Dessa forma, a inclusão de leguminosas em pastagens tem se tornado cada vez mais relevante na produção animal, devido à deposição de resíduos com uma baixa relação C, resultante da simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium*. Isso pode acelerar a mineralização da matéria orgânica, antecipando sua contribuição para a ciclagem de nutrientes e promovendo o aumento dos níveis de carbono no solo (Silva *et al.*, 2021).

Além disso, existem diversos outros benefícios relacionados ao uso dos sistemas integrados, como o aumento da fertilidade e conservação do solo (Power; Thorro; Balks, 2003; Xavier *et al.*, 2002), a melhoria do conforto térmico para os animais (Leme *et al.*, 2005), o aumento da qualidade da forragem (Abraham *et al.*, 2014) e do desempenho animal (Yamamoto; Dewi; Ibrahim, 2007), a possibilidade de diversificação de renda e ganho por serviços ambientais tais como conservação da biodiversidade (Pagiola *et al.*, 2004), o sequestro de carbono atmosférico e a mitigação de gases de efeito estufa (Schoeneberger, 2009).

As savanas são ecossistemas terrestres que contribuem com cerca de 30% da produtividade primária líquida terrestre total e são responsáveis por um significativo armazenamento de carbono globalmente, com potencial de retroalimentação para os climas regionais e globais (Grace *et al.*, 2006; Loiola *et al.*, 2015; Morais *et al.*, 2020). No entanto, apesar de sua grande contribuição para a dinâmica global do carbono e, portanto, seu potencial papel como mitigadores das mudanças climáticas (Abreu *et al.*, 2017; Bustamante *et al.*, 2012), as savanas têm recebido muito menos atenção do que outras florestas tropicais em relação a essa questão, fazendo com que sofram de desigualdade de consciência sobre biomas (Silveira *et al.*, 2019). A negligência em relação às savanas tem grandes implicações na garantia dos serviços ecossistêmicos, afetando a alocação de recursos para políticas de conservação e agendas de restauração.

Na América do Sul, as savanas são encontradas principalmente dentro do Domínio do Cerrado, que apresenta estoques de carbono notavelmente grandes (Morais *et al.*, 2020). Semelhante a outras savanas e campos ao redor do mundo, o Cerrado pode ser reconhecido como uma "floresta invertida" ou "floresta de cabeça para baixo" devido à maior proporção de estoques de carbono subterrâneos, especialmente na biomassa radicular e nos estoques de carbono do solo (Durigan *et al.*, 2012). De fato, a biomassa subterrânea do Cerrado pode representar até 75% da biomassa total (Loiola *et al.*, 2015; Morais *et al.*, 2020), e a razão entre biomassa radicular e parte aérea é, junto com outras savanas e campos, a mais alta nos trópicos. A alta biomassa subterrânea e a razão encontradas nesses ecossistemas podem ser vistas como

estratégias para superar um conjunto complexo de desafios ambientais que atuam sinergicamente, incluindo longos períodos de seca, solos de baixa fertilidade e incêndios frequentes (Cordeiro *et al.*, 2021; Moraes *et al.*, 2020; Ribeiro *et al.*, 2011).

A hipótese levantada neste estudo é que o sistema agroflorestal apresentará maiores estoques de carbono e nitrogênio no solo, devido à sua maior diversidade de espécies vegetais e interação entre árvores e pastagens, em comparação a sistemas de manejo monoculturais, promovendo benefícios tanto ambientais quanto agrícolas.

## **2 OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é mensurar os estoques de carbono e nitrogênio em diferentes camadas do solo em um sistema agroflorestal (considerando três tratamentos: componente agrícola, componente mombaça e componente arbóreo) e os mesmos estoques de dois sistemas convencionais de pastagem em monocultivo (pastagem manejada e pastagem degradada), com as mesmas condições em um determinado instante. Com base na hipótese levantada, busca-se verificar qual sistema tem mais C e N no solo após o quarto ano de implementação .

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Manejo de Pastagens

As práticas sustentáveis na agricultura, seja em climas tropicais úmidos ou em outras regiões climáticas, são essenciais para garantir a continuidade do uso do solo. A sustentabilidade agrícola é alcançada por meio da implementação de práticas de manejo que evitem o empobrecimento gradual da terra. Este empobrecimento pode ocorrer devido à remoção contínua de nutrientes do solo durante as colheitas sucessivas, assim como por mudanças físicas e químicas resultantes da erosão, lixiviação e compactação do solo cultivado (Alvim *et al.*, 1989).

Um manejo adequado de pastagens reúne práticas como calagem, adubação, controle de pragas além de técnicas como irrigação. Paralelamente, há o manejo do pastejo, que abrange o monitoramento e ajuste da carga animal, controle da frequência e intensidade do pastejo, manejo da altura residual das plantas e definição de períodos de descanso das áreas. Essas estratégias permitem aumentar a eficiência produtiva, prolongar a vida útil das pastagens e melhorar o aproveitamento de recursos, contribuindo para reduzir a necessidade de abertura de novas áreas (Mori *et al.*, 2024).

Para que uma pastagem assuma o caráter de cultura permanente, formada por plantas perenes que a rigor nunca precisam ser replantadas ou reformadas para se manterem produtivas indefinidamente, é imprescindível que haja um manejo correto. De nada adianta fornecer todos os tratamentos culturais, utilizar a melhor semente do mercado, com todos os cuidados no período de formação, se não se adotar a partir daí um sistema de manejo que atenda às necessidades da pastagem, da mesma forma que se procura atender às necessidades dos animais. Com um mau manejo, por melhor que tenha sido formada, a pastagem fatalmente entrará em declínio e precisará ser reformada com o tempo (Melado, 2000).

Os conceitos fundamentais do pastejo ecológico são o “período de repouso” e o “período de ocupação”. São fatores importantíssimos para a manutenção das boas condições vegetativas e de produção da forragem, o tempo mínimo de descanso da área entre dois pastejos, e o tempo máximo de permanência dos animais em um mesmo pasto. O período de pastejo deve ser adequadamente curto, de modo a não permitir que a brotação do capim pós- pastejo seja novamente colhido de forma precoce ou seja em parte inutilizado pelo pisoteio excessivo. Para se conseguir atender a essas condições, torna-se necessário a divisão da pastagem em um número adequado de subdivisões (piquetes).

A lotação intermitente, ou lotação rotativa (*mob grazing*), é o método de pastejo que usa períodos recorrentes de descanso e de pastejo entre dois ou mais piquetes numa pastagem durante a estação de pastejo. É mais apropriado que o termo lotação rotacionada, por não sugerir um uso sequencial dos piquetes. De fato, pode haver situações em que o terceiro piquete do sistema atinja a condição pré-pastejo mais rápido que o segundo, devendo ser usado primeiramente, o que contraria a denominação lotação rotacionada.

O uso da lotação intermitente implica na necessidade de se priorizar o ganho por área, uma vez que a adoção de baixas taxas de lotação além de reduzir a vantagem da lotação rotativa face à contínua, favorece à seletividade do animal. Isso pode ser grave pois os animais chegam a eleger áreas de pastejo dentro do piquete e renegar outras, que ficam acumulando forragem madura, reduzindo a eficiência de uso da adubação e da forragem produzida e obrigando o produtor a intervir no sistema com a prática da roçada dessa vegetação rejeitada.

### 3.2 Sistemas Agroflorestais

Existem diversas modalidades de sistemas agroflorestais (SAF) e uma delas é o sistema agrossilvipastoril (SASP), também conhecido como integração lavoura pecuária floresta (ILPF), e refere-se à técnica de produção na qual se interagem na mesma área pastagem, animais, árvores e culturas agrícolas. Sua utilização tem sido sugerida para garantir a sustentabilidade em sistemas de produção animal devido ao seu potencial de fixação de carbono, melhorar a qualidade da forragem, e proporcionar diversificação de renda para o produtor (Carvalho *et al.*, 2007). Além disso, os sistemas integrados melhoram as condições microclimáticas, com redução do estresse térmico sobre os animais e melhoria do bem-estar animal, especialmente em regiões de clima quente (Karvatte Junior *et al.*, 2016; Thornton *et al.*, 2009).

Em SAFs focados em produção animal, é imprescindível considerar o valor nutritivo das forrageiras, que é determinado pela composição química e digestibilidade da matéria seca, modificada em função de diversos fatores, tais como, condições edafoclimáticas, características inerentes à planta e práticas de manejo. As melhorias nutricionais do pasto em sistemas agroflorestais resultantes do sombreamento e da maior disponibilidade de nutrientes no solo, associadas às melhores condições de conforto térmico dos animais, sinalizam a possibilidade de aumento no consumo de forragem e no ganho de peso de animais em pastejo (Paciullo *et al.*, 2009). O ambiente luminoso, sob o qual as plantas se desenvolvem, influencia seu valor nutritivo (Abraham *et al.*, 2014). Isso faz com que as plantas que se desenvolvem em ambientes

sombreados, apresentam variações na qualidade da forragem produzida, em comparação às plantas que se desenvolvem a pleno sol (Paciullo *et al.*, 2014).

Diversas pesquisas foram conduzidas com objetivo de comparar a tolerância de espécies e, ou, cultivares de clima tropical ao sombreamento. Nesse sentido, as espécies mais cultivadas no país (*Brachiaria spp.* e *Panicum maximum*) são descritas como tolerantes ao sombreamento moderado, apresentando nessa condição respostas plásticas como incremento no comprimento de folhas, aumento da área foliar específica e diminuição do crescimento radicular para aumentar a eficiência na interceptação da radiação (Guenni; Figueroa, 2008).

O componente arbóreo reduz a disponibilidade de luz para o sub-bosque, modificando as propriedades morfofisiológicas que determinam a produtividade da forrageira. Essa alteração no ambiente luminoso modifica o padrão de alocação de biomassa da planta forrageira, o que por sua vez, determina a estrutura e o índice de área foliar do dossel forrageiro (Paciullo *et al.*, 2008). Geralmente, a produção de forragem diminui à medida que a intensidade da luz diminui, devido à fotossíntese reduzida e modificações na anatomia das folhas e colmo (Devkota; Kemp, 1999). Vários estudos mostraram que a produção de forragem não é afetada ou é ligeiramente diminuída sob porcentagens de sombra de até 30% a 40%, desde que as espécies forrageiras tenham tolerância à sombra (Devkota *et al.*, 2009).

No estabelecimento de sistemas silvipastoris recomenda-se reservar a área algum período antes da entrada dos animais para evitar possíveis danos ao componente arbóreo. Esse tempo de não utilização do pasto é definido basicamente pelo desenvolvimento das árvores. Em estudos realizados com *Pinus sp.*, verificou-se que, para evitar danos às árvores, o gado bovino não deve ser colocado antes que as plantas tenham três anos de idade ou 4 m de altura, no entanto ovelhas podem ser introduzidas mais cedo ou seja, com árvores com 2 m de altura (Lima, 2014).

### **3.3 Matéria Orgânica no Solo**

A matéria orgânica do solo (MOS) é composta por frações mortas e vivas originadas de plantas, microorganismos, e resíduos animais e microbianos, e desempenha um papel crucial na fertilidade do solo (Silva *et al.*, 2000). Seus teores adequados impactam positivamente nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, sendo determinantes para a fertilidade e, consequentemente, a produtividade de cultivos agrícolas (Mello *et al.*, 1989). A MOS é crucial para a energia dos micro-organismos do solo, tornando seu declínio ou aumento indicativo da

preservação de ecossistemas naturais e da sustentabilidade dos agroecossistemas (Kaiser; Martens; Heinemeyer, 1995; Perez; Ramos, 2004).

A MOS é sensível ao manejo agrícola, especialmente nas regiões tropicais, onde mais de 50% pode ser perdida nos primeiros anos de cultivo (Silva *et al.*, 2000). A qualidade do solo está diretamente relacionada à MOS, representando um indicador vital e influenciando atributos como estabilidade de agregados, estrutura, infiltração de água, resistência à erosão, atividade biológica e capacidade de troca catiônica (CTC) (Feiden; Almeida; Assis, 2002; Kaiser; Martens; Heinemeyer, 1995; Silva *et al.*, 2000).

A adição de materiais orgânicos é essencial para ir liberando gradualmente nutrientes e mitigando processos como lixiviação, fixação e volatilização (Leite *et al.*, 2003). Estoques de matéria orgânica adicional em componentes arbóreos desempenham um papel fundamental na disponibilidade dos nutrientes, agregação do solo e no ciclo de gases de efeito estufa (Leite *et al.*, 2003). A serapilheira, proveniente da queda de galhos e folhas, das árvores, constitui um importante compartimento para a decomposição e ciclagem de nutrientes, sendo vital para a sobrevivência e reprodução dos organismos do solo (Correia; Andrade, 1999). Desta forma os Sistemas Agroflorestais são acumuladores significativos de biomassa, destacando-se como tecnologia sustentável de desenvolvimento dos solos agrícolas nos trópicos úmidos (Osterrooht, 2002).

### **3.4 Estoques de Carbono e Nitrogênio no Solo**

O solo é um dos principais reservatórios de carbono (C) na Terra, especialmente nos primeiros centímetros da camada superficial, acumulando 2,5 vezes mais C do que a vegetação terrestre (Rangel; Silva, 2007). Conforme indicado por Bernoux *et al.* (2002), alterações nas condições edáficas (EC) podem provocar impactos substanciais na concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, tornando a capacidade de aumentar o sequestro de C no solo um tópico de grande interesse. Em regiões de clima tropical, as condições climáticas aceleram a decomposição da matéria orgânica do solo, resultando em menores estoques de C em comparação com regiões de clima temperado. Apesar dessa maior taxa de decomposição da matéria orgânica do solo (MOS), os solos em regiões tropicais armazenam 32% do total de C orgânico presente nos solos do planeta (Carvalho, 2006).

No Brasil, o carbono estocado no solo corresponde a cerca de 5% do total mundial na camada de 0 a 20 cm, com a maioria das áreas contendo entre 3 a 6 kg de carbono por metro quadrado, segundo Bernoux *et al.* (2002). Esse valor varia bastante devido à extensão



geográfica do país, influenciando os estoques de carbono de maneira significativa. Áreas com altos níveis de carbono no solo geralmente estão em regiões úmidas, como o Pantanal e a Bacia Amazônica, ou em climas mais amenos, como o Sul. Por outro lado, o semiárido do Nordeste apresenta baixos estoques de carbono. Na Amazônia, solos de florestas densas acumulam mais carbono que os de florestas menos densas.

Dependendo do uso e manejo, o solo pode funcionar como um dreno, acumulando carbono (C) na forma de matéria orgânica, ou como uma fonte emissora de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2001). No entanto, a adoção de práticas conservacionistas têm alterado esse cenário. Lal (2004) sugere que essas práticas podem sequestrar entre 30 a 60 bilhões de toneladas de C ao longo de 25 a 50 anos de cultivo, recuperando quase todo o C perdido em um curto período. No Brasil, diversos sistemas de uso e manejo da terra, como o plantio direto, a integração lavoura-pecuária-floresta, reflorestamentos, manejo de pastagens e colheita de cana-de-açúcar, podem impactar significativamente os estoques de carbono e a emissão de gases de efeito estufa (GEE) do solo para a atmosfera. Essas práticas têm um papel crucial na mitigação do aquecimento global (Carvalho, 2006).

O tipo de solo também desempenha um papel fundamental na estocagem de carbono. Solos com altos teores de argila, conforme Silva (2012), tendem a apresentar maiores quantidades de carbono. Isso ocorre porque a matéria orgânica do solo (MOS) pode formar diferentes tipos de ligações com partículas de argila, que possuem uma elevada superfície específica, promovendo a proteção coloidal da MOS.

Nos principais biomas brasileiros, como Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica, os estoques de carbono (EC) são influenciados pelas práticas agrícolas (Cerri *et al.*, 2006). No Cerrado, grande parte da vegetação original foi substituída por pastagens ou culturas anuais. A remoção do cerrado nativo resulta em menores reduções no carbono orgânico do solo comparado às áreas de mata (Zinn; Lal; Resck, 2005), podendo até manter os níveis iniciais (Silva, 1997). Práticas como pastagens bem manejadas e plantio direto podem aumentar os teores de carbono orgânico, ao contrário do cultivo convencional, que geralmente reduz esses níveis (Corazza *et al.*, 1999). Segundo Bustamante *et al.* (2006), a recuperação de pastagens degradadas no Cerrado, com melhor manejo do solo e da forragem, poderia sequestrar cerca de 1,5 mg/ha.ano de carbono, resultando em um acúmulo de 36 milhões de toneladas por ano, um valor que pode aumentar com a adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF).

As raízes desempenham um papel crucial no estoque de carbono do solo, especialmente em ecossistemas como o Cerrado, onde a biomassa subterrânea pode representar até 75% da biomassa total. Estudos como o de Almeida *et al.* (2017) demonstram que a disponibilidade de nutrientes e água no solo afeta diretamente a produção e o tamanho das raízes, o que, por sua vez, influencia a quantidade de carbono armazenado no solo. Em ambientes com baixa fertilidade e longos períodos de seca, como o Cerrado, as plantas desenvolvem sistemas radiculares profundos e extensos para maximizar a aquisição de recursos, resultando em um acúmulo significativo de carbono nas camadas mais profundas do solo.

Além disso, a elevada proporção de biomassa subterrânea e a alta razão raiz/parte aérea observada no Cerrado, como relatado por Loiola *et al.* (2015) e Morais *et al.* (2020), são estratégias adaptativas a condições ambientais desafiadoras, incluindo solos de baixa fertilidade e frequentes incêndios. Essas características não só contribuem para o armazenamento de carbono, mas também para a resiliência dos ecossistemas do Cerrado frente a distúrbios naturais. O carbono armazenado nas raízes e no solo tende a ser mais estável e menos suscetível à liberação rápida para a atmosfera, o que reforça o papel do Cerrado como um importante reservatório de carbono, com implicações significativas para a mitigação das mudanças climáticas.

A correlação entre a funcionalidade das raízes e o estoque de carbono no solo é ainda mais evidente quando consideramos a interação entre a biodiversidade e os filtros ambientais, como discutido por Cordeiro *et al.* (2021). As espécies de plantas do Cerrado, que apresentam uma alta dominância funcional de traços adaptativos, como alta densidade de madeira e espessura da casca, são fundamentais para a manutenção e o aumento dos estoques de carbono subterrâneo. Esses traços funcionais, conservados filogeneticamente conforme Batalha *et al.* (2011), asseguram que o Cerrado continue desempenhando um papel essencial na regulação do ciclo global de carbono, mesmo sob condições ambientais adversas.

A estimativa do estoque de carbono do solo depende da disponibilidade de dados sobre concentração de carbono, a densidade do solo (DS) e a profundidade do solo que se pretende estimar. Importante ressaltar que a DS pode indicar compactação do solo e limitação ao desenvolvimento de raízes (Dexter, 2004), e a retenção e o movimento da água dependem da densidade do solo (Givi; Prasher; Patel, 2004; Mendonça-Santos *et al.*, 2005). No entanto, a amostragem de campo e a medição da DS são consideradas tarefas trabalhosas e exaustivas, especialmente em profundidades abaixo de 0-30 cm. Além disso, apesar da importância da classe de solo na variação da DS (Heuscher; Brandt; Jardine, 2005), as estimativas nacionais de estoques de carbono no solo até 1 metro de profundidade, baseadas em dados de boletins de

levantamento de solos, são limitadas pela escassez de valores de DS para todas as classes de solo.

No Brasil, Bernoux *et al.* (1998) e Tomasella e Hodnett (1998) estabeleceram a primeira base para a predição da DS a partir das propriedades do solo na Bacia Amazônica. Bernoux *et al.* (1998), utilizando regressão múltipla com inclusão progressiva de variáveis ("forward stepwise"), demonstraram que o teor de argila, o carbono orgânico e o pH são os melhores indicadores de DS, enquanto Tomasella e Hodnett (1998) ajustaram regressões lineares múltiplas para estimar DS a partir dos teores de areia, silte e argila. Posteriormente, os resultados de Bernoux *et al.* (1998) foram aplicados para estimar DS e o estoque de carbono (massa de carbono por área) em solos similares em todo o Brasil (Bernoux *et al.*, 2002). O teor de matéria orgânica mostrou ter um impacto significativo na densidade do solo em horizontes aluviais de solos podzólicos em Gales (Adams, 1973). Manrique e Jones (1991) relataram que a precisão dos modelos de regressão para estimar DS em solos dos Estados Unidos foi melhorada quando os dados foram subdivididos em sub-classes.

O nitrogênio (N) é um nutriente vital para as plantas, encontrando-se, assim como o carbono (C), associado a moléculas orgânicas do tecido vegetal. Os estoques de nitrogênio (EN) no solo são influenciados pelo clima e pela vegetação. Em solos tropicais, a concentração total de N varia de 0,02 a 0,4%, podendo alcançar até 2% em solos orgânicos extremos (Stevenson, 1994). No solo, mais de 95% do N está na forma orgânica, sendo a matéria orgânica do solo (MOS) um importante reservatório de formas potencialmente disponíveis de N para as plantas, principalmente na forma de nitrato e amônio. A mineralização da MOS, que inclui processos de aminação e amonificação, converte anualmente 2 a 5% do N orgânico em N mineral. Este processo é regulado pelo uso e manejo do solo, especialmente pela inclusão de leguminosas e espécies de alta produção de biomassa nos esquemas de rotação de culturas, aumentando o armazenamento de N total no solo (Andréa *et al.*, 2004; Mielniczuk, 1999; Moreira; Siqueira, 2006).

### 3.5 Relação C/N

A relação entre carbono e nitrogênio (C/N) no solo é um parâmetro que descreve a proporção entre as quantidades de carbono (C) e nitrogênio (N) presentes em uma camada específica do solo. Este índice está relacionado a diversos processos biológicos e químicos que ocorrem no solo, especialmente aqueles relacionados à decomposição da matéria orgânica e à ciclagem de nutrientes. Em solos agrícolas, a relação C/N geralmente varia entre 10 e 12 para

1, dependendo das práticas de manejo adotadas (Anderson; Domsch, 1989). Essa faixa é frequentemente utilizada como referência para avaliar a qualidade do solo e sua capacidade de sustentar o crescimento vegetal.

O teor de Matéria Orgânica do Solo (MOS) está intimamente associado ao teor de carbono presente, uma vez que a matéria orgânica é uma das principais fontes de carbono no solo. A mineralização do nitrogênio, que é o processo pelo qual o nitrogênio na forma orgânica é convertido em formas inorgânicas disponíveis para as plantas, está fortemente correlacionada ao teor de carbono. Em regiões áridas, onde há menor precipitação, a relação C/N tende a ser mais baixa do que em solos de regiões úmidas, quando as temperaturas são semelhantes (Luchese; Favero; Lenzi, 2002). Isso se deve às diferenças na quantidade de matéria orgânica disponível e na atividade microbiana, que é influenciada pela umidade e temperatura do solo.

No solo, a proporção entre carbono e nitrogênio tende a se estabilizar em um valor C/N que se assemelha à relação encontrada nos microrganismos do solo. Estes microrganismos, que incluem bactérias, fungos e outros organismos decompositores, utilizam a matéria orgânica do solo para compor a maior parte de sua biomassa. A relação C/N também tende a diminuir com a profundidade do solo, um fenômeno observado em diversos estudos (Mello *et al.*, 1983). Esse decréscimo na relação pode ser mais ou menos acentuado dependendo das características do solo, como a textura, a presença de matéria orgânica e as condições de drenagem (Costa, 2004).

A relação C/N afeta diretamente a disponibilidade de nitrogênio no solo, influenciando a ciclagem de nutrientes e a fertilidade do solo (Raij, 1983). Quando grandes quantidades de nitrogênio mineral são aplicadas ao solo, pode ocorrer um aumento na mineralização do carbono orgânico. No entanto, esse processo não necessariamente aumenta a quantidade de nitrogênio disponível para as plantas, pois pode causar pequenas alterações na relação entre os elementos carbono e nitrogênio (Shevtsova *et al.*, 2003). Portanto, entender e monitorar a relação C/N no solo é essencial para a gestão eficiente dos nutrientes, promovendo a saúde do solo e a sustentabilidade agrícola.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Área de Estudo

O experimento foi realizado na Fazenda Mangalô, propriedade rural selecionada como Unidade Demonstrativa do Projeto Rural Sustentável Cerrado, promovido pelo Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS), localizada às margens da BR 352, km 370, no município de Abaeté, Minas Gerais (latitude 19°17'S, longitude 45° 39'W).

Figura 1 - Localização do município de Abaeté no mapa de Minas Gerais e no mapa do Brasil.



Fonte: Wikipédia (2024).

O município de Abaeté se encontra situado 100% dentro do bioma cerrado, segundo o mapa dos biomas brasileiros do IBGE (2004). A vegetação na região é típica do bioma cerrado sensu stricto, com árvores de tronco tortuoso, arbustos e gramíneas nativas. O solo é do tipo Latossolo Vermelho com horizontes B muito espesso e textura argilosa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, 2011).

O clima da região é do tipo Aw (Tropical de savana), segundo a classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013), com temperatura média anual de 23°C e precipitação média anual de 1.300 mm concentradas entre os meses de outubro e março, com verões quentes e chuvosos, e invernos secos e amenos. Estas características tendem a ser semelhantes em todo o bioma do Cerrado (Adámoli *et al.*, 1987).

No bioma predominam os Latossolo, no geral, são solos forte ou moderadamente ácidos (pH entre 4,5 e 5,5), com baixa capacidade de troca catiônica e saturação por bases, alta saturação por alumínio, associado a limitações de fósforo e nitrogênio, necessitando de intensa intervenção antrópica, o que pode gerar diversas consequências (Alves *et al.*, 2022; Ribeiro; Walter, 1998).

Dentro da propriedade escolhida para o experimento, e nas propriedades vizinhas, é possível encontrar em áreas de preservação permanente e áreas de reserva legal, fragmentos de florestas com espécies características da região, como principalmente: Pequi, Araticum, Cagaita, Jatobá, Pau-Terra, Mama Cadela, Macaúba, entre outras. Esta última é predominante na região, sendo amplamente encontrada inclusive nas áreas de pastagem, devido à facilidade de germinação da macaúba em solos argilosos e compactados após passarem pelo trato intestinal bovino, que é capaz de superar a dormência das sementes.

A área experimental foi dividida em dois grupos. O primeiro grupo é o Sistema Agroflorestal (SAF), destacado em branco na Figura 2, que compreende 3 componentes, sendo eles: componente mombaça (CM), componente agrícola (CA) e componente arbóreo ou florestal (CF). O segundo grupo é o monocultivo (MONO), destacado em vermelho e amarelo na Figura 2, que compreende a 2 tratamentos, sendo eles: pastagem degradada (PD) e pastagem manejada (PM).

Figura 2 - Área de estudo, onde foram coletadas amostras nos componentes Mombaça (CM), agrícola (CA) e arbóreo ou florestal (CF) no sistema Agroflorestal (SAF), bem como em condições de pastagem manejada (PM) e degradada (PD).



Fonte: elaboração própria.

O SAF abrange 2,0 hectares divididos em 10 faixas de 0,2 hectares, sendo 5 piquetes ou 1,0 hectare com *Panicum maximum* cv. Mombaça (CM), alternadas com 5 faixas de 0,2 hectares ou 1,0 hectare com cultivos agrícolas (CA). As faixas alternadas são separadas por linhas de

árvores (CF) com biodiversidade de espécies plantadas sendo as principais: *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Khaya grandifoliola* C. DC., *Acacia mangium* Willd., *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp, *Moringa oleífera* Lam., *Musa paradisiáca* L., *Mangifera indica* L., *Persea americana* Mill, *Hymenaea courbaril* L., *Handroanthus* ssp, *Dipteryx alata* Vogel., entre outras espécies florestais nativas e exóticas.

Entre os principais cultivos agrícolas presentes no SAF, destacam-se: abóbora (*Cucurbita moschata* D.), mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), batata-doce roxa (*Ipomoea batatas* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.).

Figura 3 - Preparo do solo e cultivo da abóbora japonesa no componente agrícola (CA) entre linhas do componente florestal (CF) no sistema agroflorestal.



Fonte: elaboração própria.

A pastagem degradada (PD) tem 0,6 hectares e encontra-se com sinais de perda de solo, plantas daninhas e a presença de cupins no solo. A área apresenta perda de produtividade e da capacidade natural de recuperação para sustentar a produção e a qualidade do capim Mombaça devido a falta de um manejo que respeitasse a altura do capim ou a taxa de lotação. A pastagem manejada (PM) possui 0,3 hectares, e neste tratamento foi adotado o manejo rigoroso de entrada e saída dos animais respeitando a altura do capim.

Ambos os sistemas partiram de uma mesma situação inicial de pastagem degradada em 2018, e foram submetidos aos mesmos procedimentos de calagem, adubação e preparo do solo. Ou seja, toda a área experimental representa o mesmo tipo de solo, e foram tratados da mesma forma para receber os plantios dos distintos sistemas de manejo. Para a caracterização do SAF e do MONO foi considerada a proporção da área ocupada por cada um dos componentes.



Em julho de 2019 deu-se início ao preparo do solo nos dois sistemas (SAF e MONO) simultaneamente. Toda a área foi arada e gradeada. Houve correção de acidez do solo com aplicação de três toneladas de calcário dolomítico por hectare. Posteriormente, em outubro do mesmo ano, o plantio do capim foi feito a lanço em área total, exceto nas linhas de árvores do SAF, onde houve abertura de covas para o plantio de mudas.

Após a implantação dos dois sistemas, que ocorreu no início da estação chuvosa (outubro de 2019), houve a entrada dos animais no MONO em fevereiro do ano seguinte, quatro meses após o plantio. No SAF os animais só começaram a entrar 2 anos depois, em fevereiro de 2022. Durante o período em que não houve entrada de animais nos piquetes do SAF, o capim foi manejado com roçadeira, sempre acumulando a biomassa nas linhas de árvores.

Figura 4 - Animais pastejando no componente mombaça (CM) do sistema agroflorestal após dois anos de implementação do sistema.



Fonte: elaboração própria.

## 4.2 Amostragem e Análise do Solo

Foram coletadas três amostras simples em pontos aleatórios dentro de cada tratamento, conforme ilustrado na Figura 2. As amostras de solo foram coletadas utilizando um trado holandês, e ocorreram em fevereiro de 2023, ou seja, 4 anos após a implantação dos sistemas. As coletas foram realizadas em seis profundidades distintas: 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm e 90-100 cm.

Após a coleta, as amostras foram embaladas com um material plástico, congeladas e acondicionadas em caixas de isopor para isolar a diferença de temperatura com o meio externo. Após, foram transportadas de carro diretamente para análise em dois laboratórios especializados da Universidade Federal de Viçosa (UFV): o Laboratório de Análise do Solo, Tecido Vegetal



e Fertilizante, e o Laboratório de Espectrometria de Absorção Atômica, ambos localizados no Departamento de Solos.

No Laboratório de Análise do Solo, as amostras passaram por análises químicas e físicas, incluindo a determinação da textura e o pH do solo em diferentes camadas. No Laboratório de Espectrometria de Absorção Atômica, foram realizadas análises específicas para a quantificação da concentração de carbono e nitrogênio. A espectrometria de absorção atômica é uma técnica capaz de detectar e quantificar elementos em concentrações extremamente baixas, sendo importante para estudos que buscam entender a disponibilidade e a mobilidade desses elementos no solo.

#### 4.3 Cálculo dos Estoques de Carbono e Nitrogênio

Os estoques de carbono e nitrogênio foram calculados usando-se como referência os modelos estatísticos desenvolvido por Benites *et al.* (2006) através das seguintes equações:

$$Ce \text{ (t/ha)} = DS \text{ (g/cm}^3\text{)} \times C \text{ (\%)} \times H \text{ (cm)} \quad (1)$$

$$Ne \text{ (t/ha)} = DS \text{ (g/cm}^3\text{)} \times N \text{ (\%)} \times H \text{ (cm)} \quad (2)$$

Onde:

Ce = Estoque de carbono;

Ne = Estoque de nitrogênio

DS = Densidade do solo;

C = Concentração de carbono;

N = Concentração de nitrogênio

H = Profundidade da amostragem de solo.

#### 4.4 Análise Estatística

Os dados obtidos a partir das análises de solo foram submetidos a um processo de verificação estatística para garantir a validade e a confiabilidade dos resultados. Primeiramente, a homogeneidade das variâncias dos erros foi avaliada utilizando o teste de Bartlett, um método estatístico que verifica se as variâncias entre diferentes grupos são iguais. A normalidade dos dados foi testada por meio do teste de Shapiro-Wilk.

Após a confirmação de que as variâncias eram homogêneas e que os dados seguiam uma distribuição normal, foi realizada a análise de variância utilizando o teste F, com um nível de significância de  $P < 0,05$ . A análise de variância foi conduzida utilizando o PROC MIXED do software SAS 9.4. e os resultados foram apresentados em gráficos, que foram gerados utilizando a média de cada tratamento juntamente com o erro padrão da média.

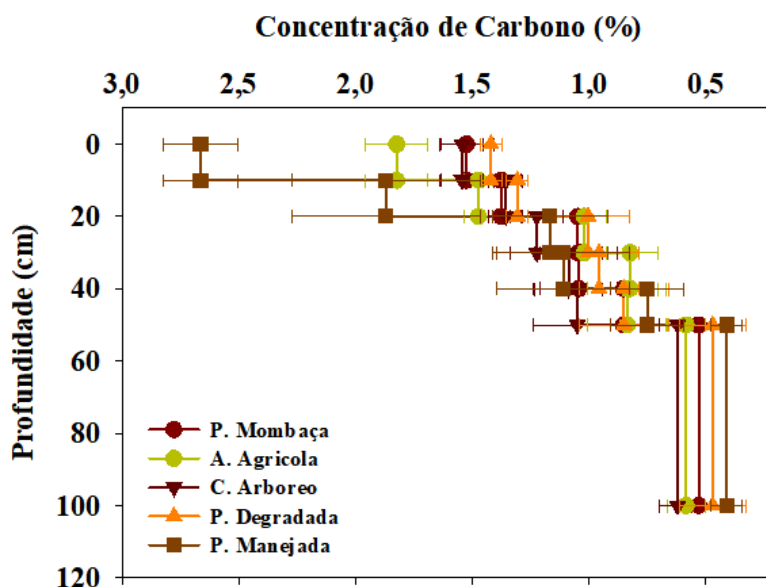
## 5 RESULTADOS

### 5.1 Concentrações de Carbono e Nitrogênio no Solo

Foi observado que a concentração de carbono diminui com o aumento da profundidade em todos os tratamentos. A maior concentração de carbono foi encontrada na camada superficial (até 20 cm de profundidade) da pastagem manejada no sistema monocultivo. No entanto, em profundidades maiores que 40 cm, a pastagem manejada apresentou as menores concentrações de carbono entre os tratamentos.

A pastagem degradada foi o tratamento que apresentou a menor concentração de carbono na camada superficial. Entre os tratamentos do Sistema Agroflorestal (SAF), a área de cultivo agrícola teve a maior concentração de carbono na camada superficial. No entanto, em camadas mais profundas, a maior concentração de carbono foi observada na linha de árvores.

Gráfico 1 - Concentração de Carbono nas diferentes camadas do solo de cada tratamento.



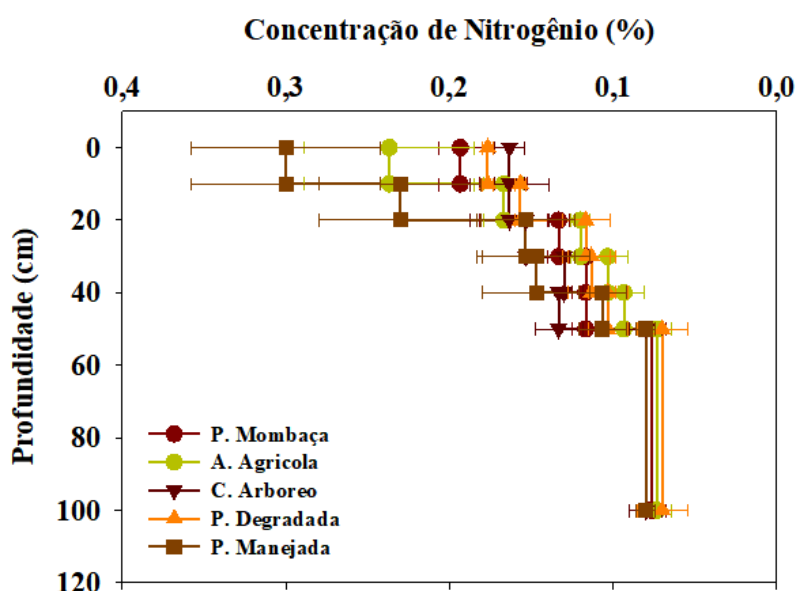
Fonte: elaboração própria.

A concentração de nitrogênio no solo segue a tendência de diminuição com o aumento da profundidade amostrada. Nas camadas superficiais (de 0 a 20 cm), observou-se uma variação significativa nas concentrações de nitrogênio entre os tratamentos. No entanto, nas camadas mais profundas (de 50 a 100 cm), as concentrações de nitrogênio foram bastante semelhantes entre os tratamentos.

A pastagem manejada exibiu as maiores concentrações de nitrogênio nas camadas superficiais do solo (até 40 cm) em comparação com os demais tratamentos. No entanto, a partir de 50 cm de profundidade, observou-se uma concentração de nitrogênio ligeiramente superior na linha de árvores.

Na camada mais superficial de 0 a 10 cm, o componente arbóreo apresentou a menor concentração de nitrogênio entre todos os tratamentos. Nas camadas mais profundas, de 50 a 100 cm, a menor concentração de nitrogênio foi observada na pastagem degradada. Por outro lado, o componente agrícola teve a maior concentração de nitrogênio entre os tratamentos do Sistema Agroflorestral (SAF) na camada superficial de 0 a 10 cm.

Gráfico 2 - Concentração de Nitrogênio nas diferentes camadas do solo de cada tratamento.

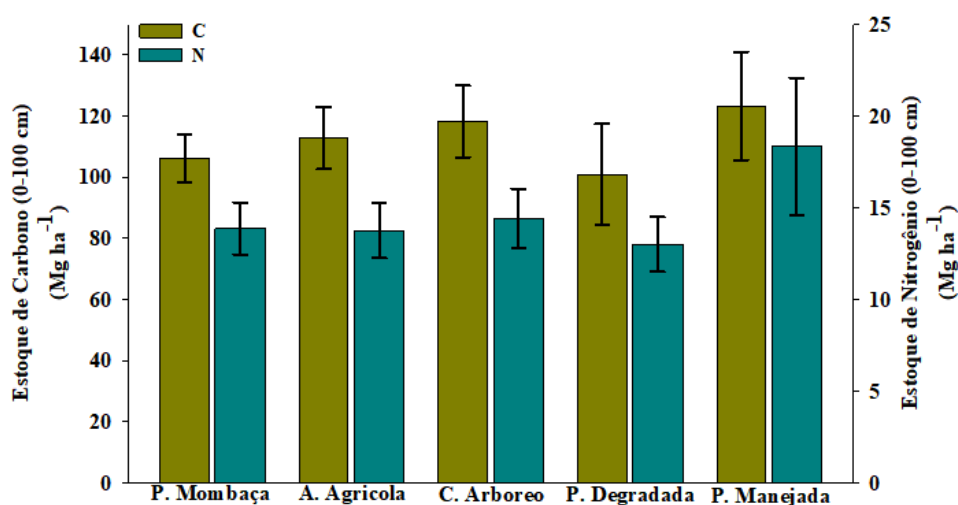


Fonte: elaboração própria.

## 5.2 Estoques de Carbono e Nitrogênio no Solo

Considerando a camada total de 0 a 100 cm de profundidade, a pastagem manejada em monocultivo apresentou o maior estoque de carbono (121 mg/ha) e de nitrogênio (110 mg/ha) no solo. Em contraste, a pastagem degradada em monocultivo registrou os menores estoques, com 99 mg/ha de carbono e 79 mg/ha de nitrogênio. Entre os tratamentos do Sistema Agroflorestral (SAF), os estoques de nitrogênio foram relativamente semelhantes, com valores em torno de 80 mg/ha. No entanto, os estoques de carbono variaram de forma mais sutil, de 108 a 119 mg/ha, com o componente arbóreo apresentando o maior valor, seguido pelo componente agrícola e, por último, pela Mombaça.

Gráfico 3 - Estoques de carbono e nitrogênio no solo de cada tratamento em 1 metro de profundidade.



Fonte: elaboração própria.

O comportamento do estoque de carbono no solo seguiu um padrão inversamente proporcional à profundidade. Ou seja, conforme a profundidade da amostra aumentava, o valor do estoque de carbono diminuía.

Na camada de 0 a 10 cm, o estoque de carbono do solo na pastagem manejada foi superior a 35 mg/ha, enquanto nos demais tratamentos os valores foram em torno de 20 mg/ha. Na camada de 10 a 20 cm, a pastagem manejada ainda apresentou o maior estoque de carbono, embora a diferença em relação aos outros tratamentos tenha diminuído. Nas duas camadas superficiais (0 a 10 e 10 a 20 cm), o componente agrícola foi o tratamento do Sistema Agroflorestal (SAF) com o maior estoque de carbono dentro do SAF, mas os valores foram inferiores aos da pastagem manejada.

A partir da camada de 20 a 30 cm, o componente arbóreo destacou-se como o tratamento do Sistema Agroflorestal (SAF) com o maior estoque de carbono no solo. A partir dessa profundidade, a variação no estoque de carbono entre os diferentes tratamentos foi mínima, com exceção da pastagem manejada, que apresentou uma redução mais acentuada.

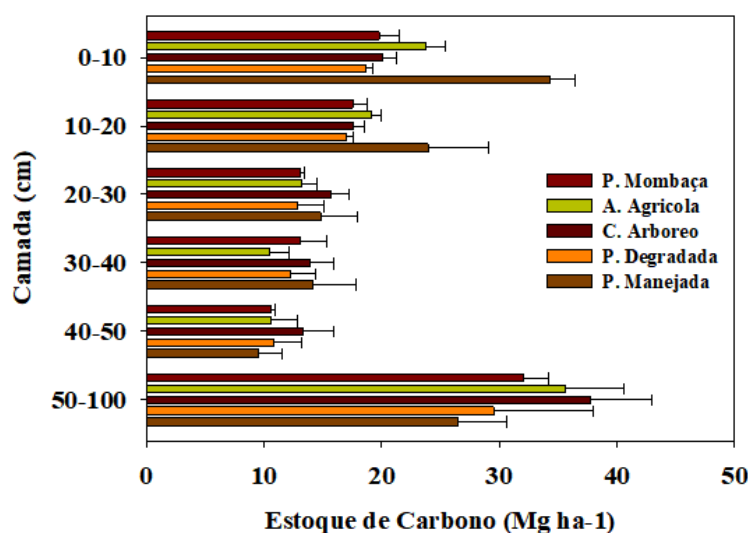
Na camada de 50 a 100 cm, o componente arbóreo teve o maior estoque de carbono entre todos os tratamentos, com aproximadamente 38 mg/ha. Em contraste, a pastagem manejada apresentou o menor estoque de carbono nesta profundidade, com cerca de 26 mg/ha.

A pastagem manejada foi o tratamento que apresentou o maior estoque de carbono na camada superficial do solo. Em contraste, mostrou o menor estoque de carbono na camada mais profunda. Para ilustrar a diminuição do estoque de carbono com o aumento da profundidade,

na camada de 10 cm de profundidade, o estoque de carbono foi de 35 mg/ha, enquanto na camada de 50 cm de profundidade, o estoque foi de apenas 26 mg/ha.

Foi observado que a pastagem manejada apresentou um estoque de nitrogênio superior ao dos outros tratamentos em todas as camadas de solo amostradas, exceto na camada de 40 a 50 cm, onde o componente arbóreo teve o maior valor. Na camada de 0 a 10 cm, a pastagem manejada apresentou um estoque de nitrogênio de 4,0 mg/ha. Esse valor diminuiu para 3,0 mg/ha na camada de 10 a 20 cm. Na profundidade de 20 a 30 cm, o estoque de nitrogênio foi de 2,0 mg/ha, e na camada de 30 a 40 cm, a variação foi mínima, com 1,9 mg/ha. Na camada mais profunda, de 50 a 100 cm, a pastagem manejada apresentou o maior estoque de nitrogênio, com 5,2 mg/ha.

Gráfico 4 - Estoque de carbono no solo em cada tratamento em diferentes camadas de profundidade.



Fonte: elaboração própria.

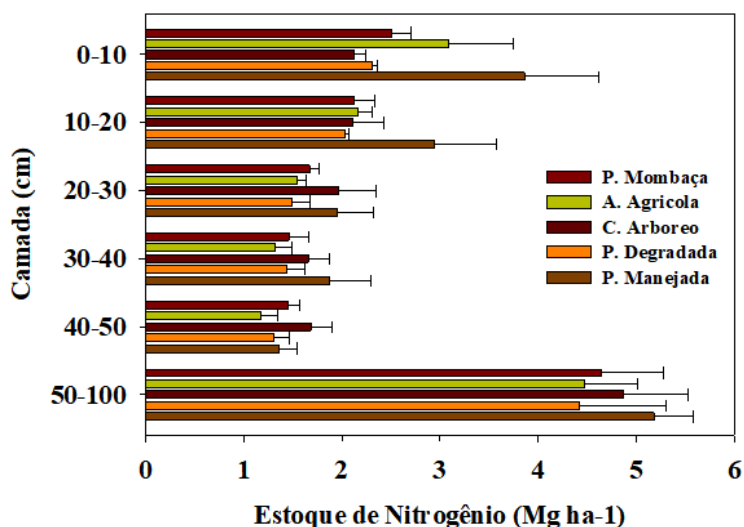
Em relação ao componente agrícola, nas camadas superficiais de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm, este tratamento ocupou a segunda posição em termos de estoque de carbono, com 3,2 mg/ha na primeira camada e 2,3 mg/ha na segunda. No entanto, nas camadas mais profundas, entre 50 e 100 cm, o componente agrícola apresentou o menor estoque de carbono entre todos os tratamentos do Sistema Agroflorestral (SAF), com 4,4 mg/ha, um valor praticamente igual ao encontrado na pastagem degradada (4,3 mg/ha). Além disso, nas camadas de 30 a 40 cm e de 40 a 50 cm, o estoque de nitrogênio do componente agrícola foi inferior ao da pastagem degradada e de todos os outros tratamentos.

O componente arbóreo apresentou os menores valores de estoque de nitrogênio na camada superficial de 0 a 10 cm, com 2,2 mg/ha, sendo o tratamento com o menor valor entre

todos os avaliados. No entanto, com o aumento da profundidade, este tratamento demonstrou uma variação mais suave em comparação com os outros, superando os demais componentes do Sistema Agroflorestal (SAF) em todas as profundidades a partir de 20 a 30 cm. Na profundidade de 40 a 50 cm, o componente arbóreo registrou um estoque de carbono superior ao da pastagem manejada, com 1,7 mg/ha.

De maneira geral, o estoque de nitrogênio diminuiu com o aumento da profundidade das camadas do solo. Em cada camada de 10 cm, os valores observados variaram entre 1 e 4 mg/ha. Proporcionalmente, na camada mais profunda de 50 cm (entre 50 e 100 cm), os valores registrados foram de 4,3 a 5,2 mg/ha.

Gráfico 5 - Estoque de nitrogênio em diferentes camadas de profundidade do solo.



Fonte: elaboração própria.

### 5.3 Características Físicas do Solo

A classificação da textura do solo nas áreas é argilo-siltosa e argilosa. Foi perceptível um aumento do teor de argila em função da profundidade, mas não houve variações significativas na granulometria do solo entre os tratamentos.

Os teores de areia foram baixos, variando entre 2 a 7% e diminuindo conforme a profundidade, exceto na pastagem degradada, que manteve o teor nas camadas mais profundas. Os teores de silte ficaram entre 27% e 49% sendo os maiores valores observados na camada superficial e diminuindo conforme a profundidade. Os percentuais de argila foram os mais altos, variando de 49 a 71% e apresentando aumento dos teores nas camadas mais profundas, exceto na pastagem manejada, onde houve variação do teor nas diferentes profundidades.

Tabela 1 - Características físicas do solo por profundidade nos diferentes tratamentos.

|                   | SAF |     |     | MONO |     |
|-------------------|-----|-----|-----|------|-----|
|                   | CM  | CA  | CF  | PD   | PM  |
| <b>pH</b>         |     |     |     |      |     |
| 0-10              | 5,8 | 5,8 | 5,7 | 4,2  | 6,0 |
| 20-30             | 5,0 | 5,1 | 5,3 | 5,5  | 5,8 |
| 40-50             | 4,9 | 5,0 | 5,4 | 4,9  | 5,6 |
| 90-100            | 4,9 | 4,7 | 5,3 | 4,8  | 5,6 |
| <b>Areia (%)</b>  |     |     |     |      |     |
| 0-10              | 4   | 7   | 5   | 2    | 4   |
| 20-30             | 2   | 7   | 4   | 2    | 2   |
| 40-50             | 2   | 5   | 3   | 2    | 3   |
| 90-100            | 2   | 4   | 3   | 2    | 3   |
| <b>Silte (%)</b>  |     |     |     |      |     |
| 0-10              | 45  | 44  | 45  | 49   | 44  |
| 20-30             | 36  | 39  | 41  | 43   | 41  |
| 40-50             | 34  | 34  | 37  | 39   | 41  |
| 90-100            | 27  | 27  | 27  | 49   | 43  |
| <b>Argila (%)</b> |     |     |     |      |     |
| 0-10              | 52  | 49  | 51  | 49   | 52  |
| 20-30             | 62  | 54  | 55  | 55   | 57  |
| 40-50             | 64  | 61  | 60  | 59   | 56  |
| 90-100            | 71  | 69  | 70  | 58   | 54  |

CM: Componente Mombaça; CA: Componente Agrícola; CF: Componente Florestal; PD: Pastagem Degradada e PM: Pastagem Manejada.

Fonte: elaboração própria.



## 6 DISCUSSÃO

### 6.1 Efeito da Camada Amostrada

Os resultados obtidos corroboram a literatura existente ao demonstrar a significativa contribuição das raízes para avaliar os estoques de carbono e nitrogênio no solo. As camadas superficiais, particularmente entre 0 e 20 cm, apresentam uma maior concentração de matéria orgânica, refletindo em estoques mais elevados de C e N. Essa maior concentração é resultado da contínua adição de resíduos vegetais e intensa atividade microbiana nas camadas. Por outro lado, nas camadas mais profundas, a influência dos sistemas de manejo sobre os estoques de C e N é menos expressiva a curto prazo. Assim, a escolha da profundidade de amostragem é crítica para captar a real dinâmica de C e N no solo, sendo mais sensível às alterações promovidas pelos sistemas de manejo nas camadas superficiais.

O fato do estoque de carbono diminuir conforme o aumento da profundidade do solo pode ser explicado pela distribuição das raízes ao longo do perfil. As raízes das plantas tendem a se concentrar nas camadas superficiais do solo, onde a disponibilidade de nutrientes e água é maior, contribuindo para um maior acúmulo de carbono nessas camadas. À medida que a profundidade aumenta, a densidade radicular diminui, resultando em menor aporte de matéria orgânica e, conseqüentemente, em menores estoques de carbono no solo.

Além disso, em ambientes sombreados, como os sistemas agroflorestais, a pastagem se desenvolve de forma menos densa, com menor cobertura vegetal e, portanto, menor presença de raízes no solo. Essa menor densidade radicular nas camadas superficiais é um dos fatores que explicam a observação de menores estoques de carbono nessas camadas, quando comparadas às pastagens manejadas em monocultivo, onde o desenvolvimento radicular é mais intenso devido à maior exposição ao sol e menor competição por luz. Esse fenômeno ressalta a importância das raízes no processo de sequestro de carbono e na manutenção da saúde do solo em diferentes sistemas de uso da terra.

A estocagem de carbono e nitrogênio em camadas profundas do solo apresenta relevância distinta nos contextos produtivo e ambiental. Para a produtividade agrícola, o carbono e nitrogênio nas camadas superficiais está mais diretamente relacionado à fertilidade do solo, influenciando a disponibilidade de nutrientes, a atividade microbiana, a estruturação do solo e o suporte ao crescimento das plantas. Em contrapartida, o carbono armazenado em camadas profundas não oferece benefícios agrônômicos imediatos, pois essas áreas são menos acessíveis às raízes e à dinâmica biológica que sustenta a produtividade agrícola. No entanto,

no contexto ambiental, o acúmulo de carbono em profundidade assume um papel de bônus do sistema, devido à sua maior estabilidade e menor suscetibilidade à decomposição e liberação de  $CO_2$  para a atmosfera. Esse sequestro de longo prazo contribui para a mitigação das mudanças climáticas, destacando a importância de práticas de manejo que favoreçam a retenção de carbono em diferentes profundidades, dependendo dos objetivos do sistema produtivo.

## 6.2 Efeito do Sistema de Manejo

Os resultados indicam que o sistema de manejo exerce uma influência significativa sobre os estoques de C e N no solo, especialmente nas camadas superficiais. Práticas de manejo eficientes, como o monocultivo bem manejado, têm mostrado um aumento considerável desses estoques em um curto período de tempo. No entanto, o impacto em camadas mais profundas, onde o acúmulo de matéria orgânica é menos intenso, só se torna evidente com a adoção de sistemas de manejo que promovem uma ciclagem mais longa de nutrientes, como os sistemas agroflorestais. Esses sistemas, ao longo do tempo, podem melhorar a retenção de C e N, contribuindo para a sustentabilidade e resiliência do solo.

A constância da relação C/N dos solos ao redor do globo é um reflexo das condições naturais dos processos bioquímicos que ocorrem no solo, onde o equilíbrio entre o carbono (C) e o nitrogênio (N) é essencial para a manutenção da saúde e da fertilidade do solo. Quando há um aporte de carbono em um determinado sistema, seja por meio da adição de matéria orgânica ou de outras práticas de manejo, é imprescindível que também ocorra um aporte proporcional de nitrogênio. Isso porque o nitrogênio é um elemento chave para a decomposição da matéria orgânica e para o funcionamento das comunidades microbianas do solo, que são responsáveis por transformar a matéria orgânica em nutrientes disponíveis para as plantas. Sem a adição correspondente de nitrogênio, o sistema pode se tornar desequilibrado, comprometendo a eficiência dos processos de decomposição e ciclagem de nutrientes. Portanto, o aporte equilibrado de carbono e nitrogênio é crucial para manter as condições bioquímicas ideais no solo, garantindo sua produtividade e sustentabilidade a longo prazo.

De acordo com Amado *et al.* (2001), um aumento no teor de MOS nas camadas superficiais é de extrema importância, uma vez que a mesma evita a deformação do solo, fato explicado pela capacidade do húmus em estabelecer ligações entre as partículas minerais, em função do seu elevado número de cargas superficiais e elevada área superficial específica. A profundidade de 0-30 cm é onde a densidade do solo e o carbono do solo são mais afetados pelo sistema de manejo (Watson *et al.*, 2000).

O carbono, quando associado ao teor de nitrogênio, pode indicar a velocidade de decomposição da matéria orgânica. É provável que a maior relação C/N encontrada no sistema agroflorestal esteja relacionada à composição dos resíduos depositados pelas diferentes espécies presentes no sistema, o que pode elevar a relação C/N do solo devido aos altos níveis de lignina e polifenóis de decomposição lenta presentes na serapilheira. Além disso, de acordo com Momesso *et al.* (2022) e Thomas e Asakawa (1993), a serapilheira de gramíneas, em geral, apresenta alta relação C/N devido à sua maior eficiência no uso de nitrogênio, fornecendo quantidades aumentadas de C, mas menos N ao sistema. Para a redução da relação C/N e o aumento da disponibilidade de nitrogênio em sistemas de gramíneas puras, seria necessário realizar um programa de fertilização, otimizando a ciclagem de nutrientes.

Segundo Silva (1997), as pastagens, em geral, apresentam distribuição regular do sistema radicular até um metro de profundidade, com 46% das raízes na camada superficial do solo (0-20 cm) e 22,8% nas camadas subsuperficiais (20-40 cm). A aparente eficiência do sistema radicular em aportar C orgânico ao solo provavelmente advém do fato de não estarem expostas aos fatores climáticos e estarem em contato direto com o solo. Os produtos de decomposição das raízes vão sendo adsorvidos aos colóides do solo e formando complexos argilo-orgânicos menos propensos à decomposição, além do fato de a atividade microbiana diminuir com a profundidade (Lal; Kimble, 1997).

Muitos estudos relatam vantagens na associação de gramíneas em árvores sistemas integrados para o acúmulo de carbono no solo (Liu *et al.*, 2017; Sollenberger; Dubeux, 2022), mas a vantagem relatada no acúmulo de C no solo em sistemas integrados em comparação com sistemas de monocultivo não é garantida (Silva *et al.*, 2022). A maior disponibilidade de nitrogênio biologicamente ativo no solo pode influenciar a velocidade de decomposição da matéria orgânica na serapilheira, promovendo mudanças na alocação de C para diferentes reservas de carbono, afetando fortemente a capacidade de sequestro de C no solo (Riggs *et al.*, 2015).

Estudos com sistemas silvipastoris relatam a relação entre o estoque de carbono e o tempo de implementação do sistema (Feliciano *et al.*, 2018; Moreira *et al.*, 2022) e as propriedades intrínsecas do solo, principalmente o teor de argila (Mosquera-Losada; Freese; Rigueiro-Rodriguez, 2011; Resck *et al.*, 2008). Os resultados encontrados neste estudo são respaldados pelos achados de Vallejo *et al.* (2012), que sugerem que o efeito da implementação de sistemas silvipastoris requer mais de 15 anos para melhorar significativamente os estoques de carbono no solo.

## 7 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam que a hipótese inicial, de que os sistemas agroflorestais apresentariam maiores estoques de carbono e nitrogênio em todas as camadas do solo, não foi confirmada no momento avaliado. Observou-se que o manejo adequado da pastagem de mombaça em monocultivo foi mais eficaz para o aumento de estoques de carbono e nitrogênio nas camadas superficiais.

Em contraste, os sistemas agroflorestais apresentaram uma distribuição diferenciada de carbono ao longo do perfil do solo, com estoques mais elevados em camadas profundas. Embora esse comportamento não tenha implicações imediatas para a fertilidade ou produtividade agrícola, ele pode representar uma contribuição relevante no contexto ambiental, como o potencial de sequestro de carbono a longo prazo.

Esses resultados ressaltam a importância de estudos de longa duração para compreender plenamente os impactos dos diferentes sistemas de manejo sobre os estoques de carbono e nitrogênio no solo a longo prazo, considerando tanto os benefícios agronômicos quanto às implicações ambientais.

## REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, E. M. *et al.* Growth, dry matter production, phenotypic plasticity, and nutritive value of three natural populations of *Dactylis glomerata* L. under various shading treatments. **Agroforestry Systems**, Heidelberg, v. 88, p. 287-299, 2014.
- ABREU, R. C. R. *et al.* The biodiversity cost of carbon sequestration in tropical savanna. **Science Advances**, Storrs, v. 3, n. 8, 2017. DOI: 10.1126/sciadv.1701284.
- ADÂMOLI, J. *et al.* Caracterização da região dos cerrados. *In*: GOEDERT, W. J. (org.). **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. Planaltina: Embrapa/CPAC, 1987. p. 339.
- ADAMS, W. A. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. **Journal of Soil Science**, London, v. 24, n. 1, p. 10-17, Mar. 1973.
- ALMEIDA, L. V. *et al.* Seasonal changes of fructans in dimorphic roots of *ichthyothere terminalis* (Spreng.) blake (Asteraceae) growing in cerrado. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 598, p. 404-412, Nov. 2017.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, W. dos S. *et al.* USLE modelling of soil loss in a Brazilian cerrado catchment. **Remote Sensing Applications: society and environment**, New York, v. 27, p. 100788, 2022.
- ALVIM, M. J. *et al.* Efeito da aplicação de nitrogênio em pastagens de azevém sobre a produção de leite. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 18, n. 1, p. 21-30, 1989.
- AMADO, T. J. C. *et al.* Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, p. 189-197, 2001.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 21, n. 4, p. 471-479, 1989.
- ANDRÉA, A. F. d'. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 2, p. 179-186, fev. 2004.
- BATALHA, M. A. *et al.* Trait diversity on the phylogeny of cerrado woody species. **Oikos**, Buenos Aires, v. 120, n. 11, p. 1741-1751, 2011.
- BENITES, V. M. *et al.* **Funções de pedotransferência para estimativa da densidade dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 104).

BERNOUX, M. *et al.* Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 3, p. 888-896, May 2002.

BERNOUX, M. *et al.* Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, n. 3, p. 743-749, May/June 1998.

BUSTAMANTE, M. *et al.* Potential impacts of climate change on biogeochemical functioning of Cerrado ecosystems. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 72, p. 655-671, Aug. 2012. Supplement 3.

BUSTAMANTE, M. M. C. *et al.* Soil carbon and sequestration potential in the Cerrado Region of Brazil. In: LAL, R. *et al.* (ed.). **Carbon sequestration in soils of Latin America**. New York: Haworth, 2006. p. 285-304.

CARVALHO, A. M. Emissão de óxidos de nitrogênio associada à aplicação de uréia sob plantio convencional e direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 4, p. 679-685, 2006.

CARVALHO, M. M. *et al.* Experiências com SSP's no bioma Mata Atlântica na região sudeste. In: FERNANDES, E. N. *et al.* (ed.). **Sistemas agrossilvipastoris na América do Sul: desafios e potencialidades**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2007. p. 105-136.

CERRI, C. E. P. *et al.* Potential of soil carbon sequestration in the Amazonian Tropical Rainforest. In: LAL, R. *et al.* (ed.). **Carbon Sequestration in Soils of Latin America**. Boca Raton: CRC, 2006. p. 245-266.

CORAZZA, E. J. *et al.* Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Campinas, v. 23, p. 425-432, 1999.

CORDEIRO, N. G. *et al.* The role of environmental filters in Brazilian savanna vegetation dynamics. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 500, Nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119645>.

CORREIA, M. E. F.; ANDRADE, A. G. de. Formação de serrapilheira e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 137-158.

COSTA, J. B. **Caracterização e constituição do solo**. 7. ed. Lisboa: Fundação Calouste, 2004.

DEVKOTA, N. R. *et al.* Relationship between tree canopy height and the production of pasture species in a silvopastoral system based on alder trees. **Agroforestry Systems**, Heidelberg, v. 76, p. 363-374, 2009.

DEVKOTA, N. R.; KEMP, P. D. Morphological aspects of pasture species in the shade in relation to various management practices under silvopastoral systems. **Journal of the Institute of Agriculture and Animal Science**, Kirtipur, v. 19/20, p. 1-26, 1999.

DEXTER, A. R. Soil physical quality part I: theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3/4, p. 201-214, June 2004.

DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens**: processos, causas e estratégias de recuperação. 4. ed. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2011.

DIAS FILHO, M. B. **Diagnóstico das pastagens no Brasil**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. (Documentos, 22).

DUBEY, A. *et al.* Soil microbiome: a key player for conservation of soil health under changing climate. **Biodiversity and Conservation**, London, v. 28, p. 2405-2429, July 2019.

DURIGAN, G. *et al.* The root to shoot ratio of trees from open- and closed-canopy cerrado in South-Eastern Brazil. **Plant Ecology & Diversity**, London, v. 5, n. 3, p. 333-343, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **O novo mapa de solos do Brasil**: legenda atualizada. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2011. (Documentos, 16).

FEIDEN, A.; ALMEIDA, D. L. de; ASSIS, R. L. de. Processo de conversão de sistemas de produção convencionais para sistemas de produção orgânicos. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, DF, v. 19, n. 2, p. 179-204, maio/ago. 2002.

FELICIANO, D. *et al.* Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 254, p. 117-129, 2018.

GARCIA, R.; COUTO, L. Sistemas silvipastoris: tecnologia emergente de sustentabilidade. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUÇÃO ANIMAL EM PASTEJO, 1., 1997, Viçosa, MG. **Anais [...]**. Viçosa, MG: Editora UFV, 1997. p. 447-471.

GIVI, J.; PRASHER, S. O.; PATEL, R. M. Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 70, n. 2, p. 83-96, Nov. 2004.

GRACE, J. *et al.* Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. **Journal Biogeography**, Oxford, v. 33, n. 3, p. 387-400, 2006.

GUENNI, S.; FIGUEROA, R. Growth responses of three *Brachiaria* species to light intensity and nitrogen supply. **Tropical Grasslands**, Brisbane, v. 42, p. 75-87, 2008.

HEUSCHER, S. A.; BRANDT, C. C.; JARDINE, P. M. Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 1, p. 51-56, Jan. 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário 2017**: resultados preliminares. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: [https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo\\_agro/resultadosagro/estabelecimentos.htm](https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/estabelecimentos.htm). Acesso em: 10 mar. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE lança o mapa de biomas do Brasil e o mapa de vegetação do Brasil, em comemoração ao dia mundial da biodiversidade.** Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Disponível em:

<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/12789-asi-ibge-lanca-o-mapa-de-biomas-do-brasil-e-o-mapa-de-vegetacao-do-brasil-em-comemoracao-ao-dia-mundial-da-biodiversidade>. Acesso em: 10 dez. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa da pecuária municipal.** 2023. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html>. Acesso em: 10 mar. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Mudança do clima no Brasil:** aspectos econômicos, sociais e regulatórios. São Paulo: IPEA, 2011.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2001:**

synthesis report: a contribution of working groups I, II, and III to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

KAISER, E. A.; MARTENS, R.; HEINEMEYER, O. Temporal changes in soil microbial biomass carbon in arable soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 170, p. 287-295, 1995.

KARVATTE JUNIOR, N. *et al.* **Microclima e índices de conforto térmico em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no município de Campo Grande, Mato Grosso do Sul.** Brasília, DF: Embrapa, 2016.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, New York, v. 304, p. 1623-1627, 2004.

LAL, R.; KIMBLE, J. M. Conservation tillage for carbon sequestration. **Nutrition Cycling in Agrosystems**, Amsterdam, v. 49, p. 243-253, 1997.

LEITE, L. F. C. *et al.* Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, p. 821-832, 2003.

LEME, T. M. P. P. *et al.* Comportamento de vacas mestiças Holandês x Zebu, em pastagem de *Brachiaria decumbens* em sistema silvipastoril. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, p. 668-675, 2005.

LIMA, M. A. **Características estruturais e acúmulo de forragem do capim-braquiária em sistema silvipastoril e monocultivo.** 2014. 62 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

LIU, S. B. *et al.* Degradation of Tibetan grasslands: consequences for carbon and nutrient cycles. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 252, p. 93-104, 2018.



LIU, Y. *et al.* Leguminous species sequester more carbon than gramineous species in cultivated grasslands of a semi-arid area. **Solid Earth**, Gottingen, v. 8, p. 83-91, 2017.

LOIOLA, P. P. *et al.* The role of environmental filters and functional traits in predicting the root biomass and productivity in savannas and tropical seasonal forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 342, p. 49-55, Apr. 2015.

LUCHESI, E. B.; FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. **Fundamentos da química do solo teoria e prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2002.

MANRIQUE, L. A.; JONES, C. A. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 2, p. 476-481, Mar./Apr. 1991.

MAYER, M. *et al.* Tamm review: influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: a knowledge synthesis. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 466, p. 118127, 2020.

MELADO, J. **Manejo de pastagem ecológica**: um conceito para o terceiro milênio. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2000.

MELLO, F. de A. F. **Fertilidade do solo**. Piracicaba: Editora ESALQ-USP, 1989.

MELLO, F. de A. F. *et al.* **Fertilidade do solo**. São Paulo: Nobel, 1983.

MENDONÇA-SANTOS, M. L.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Predição e mapeamento de capacidade de retenção de água do solo usando funções de pedotransferência e modelagem quantitativa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Anais [...]**. Recife: Embrapa Solos, 2005. 1 CD-ROM.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. de A.; CAMARGO, F. A. de O. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 1-8.

MOHANRAM, S.; KUMAR, P. Rhizosphere microbiome: revisiting the synergy of plant-microbe interactions. **Annals of Microbiology**, Berlin, v. 69, n. 4, p. 307-320, 2019.

MOMESSO, L. *et al.* Forage grasses steer soil nitrogen processes, microbial populations, and microbiome composition in a long-term tropical agriculture system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 323, Jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107688>.

MORAIS, V. A. *et al.* Spatial distribution of soil carbon stocks in the Cerrado biome of Minas Gerais, Brazil. **Catena**, Amsterdam, v. 185, Feb. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104285>.

MOREIRA, E. D. S. *et al.* Soil carbon stock and biological activity in silvopastoral systems planted with *Eucalyptus grandis* in a tropical climate. **Soil Research**, Rome, v. 60, p. 705-718, 2022.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.

MORI, C. de *et al.* **Uso das práticas de manejo de forrageiras e de pastejo na bovinocultura de corte**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2024. (Documentos, 146). Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/381316968\\_Uso\\_das\\_praticas\\_de\\_manejo\\_de\\_forrageiras\\_e\\_de\\_pastejo\\_na\\_bovinocultura\\_de\\_corte](https://www.researchgate.net/publication/381316968_Uso_das_praticas_de_manejo_de_forrageiras_e_de_pastejo_na_bovinocultura_de_corte). Acesso em: 10 mar. 2025.

MOSQUERA-LOSADA, M. M.; FREESE, D.; RIGUEIRO-RODRIGUEZ, A. Carbon sequestration in European agroforestry systems. *In*: KUMAR, B. M.; NAIR, P. K. R. (ed.). **Carbon sequestration in agroforestry systems: opportunities and challenges**. 8<sup>th</sup> ed. Amsterdam: Springer Science, 2011. p. 43-59.

OLIVEIRA, S. F.; PRADO, R. B.; MONTEIRO, J. M. G. Impactos das mudanças climáticas na produção agrícola e medidas de adaptação sob a percepção de atores e produtores rurais de Nova Friburgo, RJ. **Interações**, Campo Grande, v. 23, n. 4, p. 1179-1201, 2022.

OSTERROOHT, von M. Manejo de sistemas agroflorestais. **Agroecologia Hoje**, Botucatu, v. 15, p. 12-13, 2002.

PACIULLO, D. S. C. *et al.* Características do pasto e desempenho de novilhas em sistema silvipastoril e pastagem de braquiária em monocultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 44, p. 1528-1535, 2009.

PACIULLO, D. S. C. *et al.* Crescimento do pasto de capim-braquiária influenciado pelo nível de sombreamento e pela a estação do ano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, p. 317-323, 2008.

PACIULLO, D. S. C. *et al.* Sward characteristics and performance of dairy cows in organic grass-legume pastures shaded by tropical trees. **Animal**, Cambridge, v. 8, p. 1264-1271, 2014.

PAGIOLA, S. *et al.* **Paying for biodiversity conservation services in agricultural landscapes**. Washington, DC: World Bank, 2004. (Environment Department Paper, 96. Environmental Economics Series).

PEREZ, K. S. S.; RAMOS, M. C. Carbono da biomassa microbiana em solo cultivado com soja sob diferentes sistemas de manejo nos cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 6, p. 567-573, jun. 2004.

POWER, I. L.; THORRO, L. D.; BALKS, M. S. Soil properties and nitrogen availability in silvopastoral plantings in Acacia melanoxylon in North Island, New Zealand. **Agroforestry Systems**, Heidelberg, v. 57, p. 225-237, 2003.

RAIJ, B. V. **Avaliação da fertilidade do solo**. 2. ed. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1983.

RAMESH, T. *et al.* Soil organic carbon dynamics: impact of land use changes and management practices. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 156, p. 1-107, 2019.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Carbon and nitrogen storage and organic fractions in Latosol submitted to different use and management systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 6, p. 1609-1623, 2007.

RESCK, D. V. S. *et al.* Dynamics of organic matter in the Cerrado. *In*: SANTOS, G. de A. *et al.* (ed.). **Soil organic matter fundamentals: tropical and subtropical ecosystems**. 2<sup>nd</sup> ed. Porto Alegre: Metropolis, 2008. p. 359-417.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma cerrado. *In*: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (org.). **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília, DF: Embrapa, 1998. p. 89-166.

RIBEIRO, S. C. *et al.* Above- and below-ground biomass in a Brazilian cerrado. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, n. 3, p. 491-499, Aug. 2011.

RIGGS, C. E. *et al.* Nitrogen addition changes grassland soil organic matter decomposition. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 125, p. 203-219, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-015-0123-2>.

SCHEMBERGUE, A. *et al.* Sistemas agroflorestais como estratégia de adaptação aos desafios das mudanças climáticas no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, DF, v. 55, n. 1, p. 9-30, 2017.

SCHOENEBERGER, M. M. Agroforestry: working trees for sequestering carbon on agricultural lands. **Agroforestry Systems**, Heidelberg, v. 75, p. 27-37, 2009.

SHEVTSOVA, L. *et al.* Effect of natural and agricultural factors on long-term soil organic matter dynamics in arable soddy-podzolic soils - modeling and observation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, n. 1/2, p. 165-189, 2003.

SILVA, C. A. **Mineralização de nitrogênio e enxofre e caracterização de substâncias húmicas em solos brasileiros por 13 C-RMN e cromatografia por exclusão de tamanho**. 1997. 82 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1997.

SILVA, E. A. Frações de carbono em topossequências de solos sob eucalipto com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, p. 1167-1178, 2012.

SILVA, H. M. *et al.* Greenhouse gas mitigation and carbon sequestration potential in humid grassland ecosystems in Brazil: a review. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 323, p. 116-269, 2022.

SILVA, L. de M. vaz da; PASCAL, A. Dinâmica e modelagem da matéria orgânica do solo com ênfase ao ecossistema tropical. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 14, n. 3, p. 13-24, 2000.

SILVA, M. A. *et al.* Isolated and mixed cover crops to improve soil quality and commercial crops in the Cerrado. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 10, n. 12, p. 1-11, 2021.

SILVA, S. da *et al.* Soil carbon and nitrogen stocks in nitrogen-fertilized grass and legume-grass forage systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 122, p. 105-117, 2022.

SILVEIRA, E. M. O. *et al.* Carbon-diversity hotspots and their owners in Brazilian southeastern Savanna, Atlantic Forest and Semi-Arid Woodland domains. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 452, Nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117575>.

SOLLENBERGER, L. E.; DUBEUX, J. C. B. Warm-climate, legume-grass forage mixtures versus grass-only swards: an ecosystem services comparison. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 51, p. 1-17, 2022.

SOUSA, L. F. *et al.* Nutritional evaluation of “Braquiarão” grass in association with “Aroeira” trees in a silvopastoral system. **Agroforestry Systems**, Heidelberg, v. 79, p. 179-189, 2010.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry**: genesis, composition, reactions. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Wiley, 1994. 496 p.

THOMAS, R. J.; ASAKAWA, N. M. Decomposition of leaf litter from tropical forage grasses and vegetables. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 25, n. 10, p. 1351-1361, 1993.

THORNTON, P. K. *et al.* The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: a review of what we know and what we need to know. **Agricultural Systems**, Essex, v. 101, n. 3, p. 113-127, 2009.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, Philadelphia, v. 163, n. 3, p. 190-202, Mar. 1998.

VALLEJO, V. E. *et al.* Effect of land management and *Prosopis juliflora* (Sw.) DC trees on soil microbial community and enzymatic activities in intensive silvopastoral systems of Colombia. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 150, p. 139-148, 2012.

WATSON, R. T. *et al.* **Land use, land-use change, and forestry**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 377 p.

WHALEN, J. K. *et al.* Transforming plant carbon into soil carbon: process level controls on carbon sequestration. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 94, n. 6, p. 1065-1073, 2014.

WIKIPÉDIA. **Abaeté**. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Abaeté%C3%A9>. Acesso em: 10 dez. 2024.

XAVIER, D. F. *et al.* Melhoramento da fertilidade do solo em pastagem de *Brachiaria decumbens* associada com leguminosas arbóreas. **Pasturas Tropicales**, Cali, v. 25, p. 23-26, 2002.

YAMAMOTO, W.; DEWI, I. A.; IBRAHIM, M. Effects of silvopastoral areas on milk production at dual-purpose cattle farms at the semi-humid old agricultural frontier in central Nicaragua. **Agricultural Systems**, Essex, v. 94, p. 368-375, 2007.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, p. 28-40, 2005.