

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - CCA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE – PPGAA

GUILHERME AMORIM VENTRICHE FAVERO DA SILVA

**Estimativa de emissão de gases de efeito estufa e captura de carbono em fazenda de
pecuária no Centro-Oeste do Brasil**

ARARAS – SÃO PAULO
2025

GUILHERME AMORIM VENTRICHE FAVERO DA SILVA

**Estimativa de emissão de gases de efeito estufa e captura de carbono em fazenda de
pecuária no Centro-Oeste do Brasil**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Agricultura e Ambiente ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar/CCA).

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Barretto de Figueiredo.

Coorientador: Dr. Vinicius Câmara Costa

ARARAS – SÃO PAULO

2025

Silva, Guilherme Amorim Ventrache Favero da

Estimativa de emissão de gases de efeito estufa e captura de carbono em fazenda de pecuária no centro-oeste do Brasil / Guilherme Amorim Ventrache Favero da Silva -- 2024.
71f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Araras, Araras
Orientador (a): Eduardo Barretto de Figueiredo
Banca Examinadora: Anna Hoffmann Oliveira, Newton La Scala Junior
Bibliografia

1. Inventário de gases de efeito estufa. 2. Captura de carbono. I. Silva, Guilherme Amorim Ventrache Favero da. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Helena Sachi do Amaral - CRB/8
7083



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Agrárias
Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Guilherme Amorim Ventrache Favero da Silva, realizada em 13/12/2024.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Eduardo Barretto de Figueiredo (UFSCar)

Profa. Dra. Anna Hoffmann Oliveira (UFSCar)

Prof. Dr. Newton La Scala Junior (UNESP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a toda espiritualidade, minha mais profunda gratidão pelo amparo, discernimento e força ao longo desta jornada.

À minha avó, Claudinete Amorim, sou imensamente grato pelo apoio incondicional, pela presença constante e pela confiança que sempre depositou em mim. Seu incentivo me deu forças para superar cada desafio, e seu otimismo foi essencial para que eu chegasse até aqui.

À memória da minha mãe, Kelly, que me ensinou o valor do conhecimento, do amor e do respeito ao próximo. Seu legado permanece vivo em mim.

À minha querida família, expresso meu mais sincero agradecimento por estarem ao meu lado em todos os momentos, oferecendo amor, compreensão e apoio inabaláveis. Vocês foram e sempre serão minha maior inspiração e motivação.

À minha namorada, Thaís, minha gratidão por todo apoio emocional na etapa final, que foi essencial para a conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Barretto de Figueiredo, sou profundamente grato pela orientação cuidadosa, paciência e dedicação ao longo deste trabalho. Seu conhecimento e direcionamento foram fundamentais para a realização desta pesquisa.

À Agrorobótica, agradeço por fornecer os dados e pelo apoio essencial para a conclusão deste estudo.

À equipe do Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente e à UFSCar – Centro de Ciências Agrárias, agradeço por proporcionarem a estrutura e o suporte necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento desta pesquisa (código de financiamento 001), meu agradecimento.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para esta trajetória, meu sincero muito obrigado.

RESUMO

De acordo com o Plano de Agricultura de Baixo Carbono (ABC+), dentre as diversas estratégias para a recuperação de áreas degradadas, destaca-se a introdução de sistemas integrados como uma alternativa altamente rentável e sustentável. A implementação desses sistemas promove melhorias significativas na produtividade, na qualidade do solo e no equilíbrio dos ecossistemas, gerando benefícios socioeconômicos e ambientais. Neste contexto, o presente estudo quantificou as emissões de gases de efeito estufa (GEE) por meio de um inventário elaborado conforme as diretrizes do IPCC 2006, em uma área localizada em Serranópolis, Goiás. Foram analisados quatro cenários distintos: Integração Pecuária-Floresta (IPF), Pastagem Manejada 1 (PM 1), Pastagem Manejada 2 (PM 2) e Eucalipto Monocultura (EM). Todos os sistemas partiram da conversão de uma área de PM 1. Para compreender a dinâmica do estoque de carbono, do carbono orgânico do solo e do índice de humificação da matéria orgânica em cada cenário, foram realizadas análises químicas e físicas dos elementos do solo, utilizando tecnologias fotônicas avançadas, como Espectroscopia de Emissão em Plasma Induzido por Laser (LIBS – *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) e Espectroscopia de Fluorescência Induzida por Laser (LIFS – *Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy*). Os resultados das pegadas de carbono indicaram os seguintes valores: 14,7 kg CO₂eq kg⁻¹ de ganho de peso vivo (GPV) para o sistema IPF, 10,9 kg CO₂eq kg⁻¹ GPV para PM 1 e 17 kg CO₂eq kg⁻¹ GPV para PM 2. Ao considerar o balanço de carbono, integrando todas as fontes de emissão e o sequestro de carbono pela biomassa aérea nos sistemas IPF e EM, observou-se um balanço negativo de 15.267,33 tCO₂eq ano⁻¹. As estimativas sugerem que o sequestro de carbono no sistema IPF alcançou 5.673.439,2 kg CO₂eq ano⁻¹, sendo suficiente não apenas para compensar todas as emissões de GEE desse sistema, mas também para gerar um crédito potencial de 4.547.484,03 kg CO₂eq ano⁻¹. Além disso, a conversão de PM 1 para IPF indicou um acúmulo de carbono no solo de 2,45 t C ha⁻¹ ano⁻¹, equivalente à absorção de 8,98 t CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ da atmosfera. Para o sistema EM, considerando o mesmo cenário base e um período de 10 anos após o plantio de eucalipto, estimou-se um acúmulo de carbono no solo de 0,24 t C ha⁻¹ ano⁻¹, correspondente à absorção de 0,88 t CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ da atmosfera. Esses resultados destacam a relevância dos sistemas integrados no contexto de uma agricultura sustentável e alinhada às metas climáticas globais.

Palavras-chaves: Inventário de GEE, sustentabilidade, estoque de Carbono, manejos sustentáveis, conversão, produtividade, rentabilidade sustentável

ABSTRACT

According to the Low Carbon Agriculture Plan (ABC+), among the various strategies for recovering degraded areas, the introduction of integrated systems stands out as a highly profitable and sustainable alternative. The implementation of these systems promotes significant improvements in productivity, soil quality, and ecosystem balance, generating socio-economic and environmental benefits. In this context, the present study quantified greenhouse gas (GHG) emissions through an inventory prepared according to the 2006 IPCC guidelines, in an area located in Serranópolis, Goiás. Four distinct scenarios were analyzed: Livestock-Forest Integration (ILF), Managed Pasture 1 (MP 1), Managed Pasture 2 (MP 2), and Eucalyptus Monoculture (EM). All systems originated from the conversion of a PM 1 area. To understand the dynamics of carbon stock, soil organic carbon, and the humification index of organic matter in each scenario, chemical and physical analyses of soil elements were performed using advanced photonic technologies such as Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) and Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy (LIFS). The carbon footprint results indicated the following values: 14.7 kg CO₂eq kg⁻¹ of live weight gain (LWG) for the ILF system, 10.9 kg CO₂eq kg⁻¹ LWG for MP 1, and 17 kg CO₂eq kg⁻¹ LWG for MP 2. When considering the carbon balance, integrating all emission sources and carbon sequestration by aerial biomass in the IPF and EM systems, a negative balance of 15,267.33 tCO₂eq year⁻¹ was observed. Estimates suggest that carbon sequestration in the ILF system reached 5,673,439.2 kg CO₂eq year⁻¹, sufficient not only to offset all GHG emissions from this system but also to generate a potential credit of 4,547,484.03 kg CO₂eq year⁻¹. Additionally, the conversion from MP 1 to ILF indicated a soil carbon accumulation of 2.45 t C ha⁻¹ year⁻¹, equivalent to the absorption of 8.98 t CO₂ ha⁻¹ year⁻¹ from the atmosphere. For the EM system, considering the same baseline scenario and a period of 10 years after eucalyptus planting, a soil carbon accumulation of 0.24 t C ha⁻¹ year⁻¹ was estimated, corresponding to the absorption of 0.88 t CO₂ ha⁻¹ year⁻¹ from the atmosphere. These results highlight the relevance of integrated systems in the context of sustainable agriculture aligned with global climate goals.

Keywords: GHG inventory, sustainability, Carbon stock, sustainable management, conversion, productivity, sustainable profitability.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

IPCC – Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas

IPF – Integração pecuária floresta

PM 1 – Pastagem manejada 1

PM 2 – Pastagem maneja 2

EM – Eucalipto Monocultura

GEE – Gases de efeito estufa

LIBS - Laser Induced Breakdown Spectroscopy

LIFS - Espectroscopia de Fluorescência Induzida por Laser

MOS- Matéria orgânica

Ca – Cálcio

Mg – Magnésio

P – Fósforo

K – Potássio

V% - Saturação por Base

M% - Saturação de Alumínio

EC – Estoque de Carbono

OC – Teor de carbono orgânico

Mg ha⁻¹- miligrama por hectare

g kg⁻¹ – grama por quilograma

Dsolo - densidade do solo (g cm⁻³)

g cm⁻³ – grama por centímetro cúbico

N₂O – Óxido nitroso

CH₄ - Metano

C₂O – Dióxido de carbono

C₂O eq – Carbono equivalente

Ha – Hectares

t – Tonelada

GWP – Potencial de aquecimento

EF – Fator de emissão

DE – Digestibilidade

L – Litro

H_{FIL} - Índice de humificação

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de pedologia para a localização da área de estudo circundada em preto que está localizada em Serranópolis - GO, tendo os 4 cenários avaliados: Integração Pecuária Floresta (IPF), Pastagem manejada 1 (PM 1), Pastagem manejada 2 (PM 2) e Eucalipto monocultura (EM).	23
Figura 2. Mapa de precipitação anual para a localização da área de estudo circundada em preto que está localizada em Serranópolis - GO, tendo os 4 cenários avaliados: Integração Pecuária Floresta (IPF), Pastagem manejada 1 (PM 1), Pastagem manejada 2 (PM 2) e Eucalipto monocultura (EM).	25
Figura 3. Sistema LIBS utilizado no estudo.	29
Figura 4. Mapa com os pontos amostrais georreferenciados com a localização da área de estudo circundada em preto que está localizada em Serranópolis - GO, tendo os 4 cenários avaliados: Integração Pecuária Floresta (IPF), Pastagem manejada 1 (PM 1), Pastagem manejada 2 (PM 2) e Eucalipto monocultura (EM).	31
Figura 5. Balanço de GEE da fazenda toda e remoção total de carbono da fazenda, considerando as emissões de GEE para os sistemas de manejo avaliados: Integração Pecuária Floresta (IPF), Pastagem Manejada 1 (PM 1), Pastagem Manejada 2 (PM 2), Eucalipto	42
Figura 6. Estoque de carbono do solo (t ha ⁻¹) para os diferentes manejos avaliados; Integração Pecuária Floresta (IPF), Pastagem manejada 1 (PM 1), Pastagem manejada 2 (PM 2) e Eucalipto monocultura (EM) para 0-60 cm de profundidade.	44
Figura 7. Distribuição espacial do estoque de carbono (EC) (t ha ⁻¹) para os diferentes manejos avaliados: Integração Pecuária Floresta (IPF), Pastagem manejada 1 (PM 1), Pastagem manejada 2 (PM 2) e Eucalipto monocultura (EM) para 0-60 cm de profundidade.	45
Figura 8. Concentração de carbono do solo (g kg ⁻¹) nas camadas de 0-10; 10-20; 20-30; 30-40 e 40-60 cm, para os diferentes manejos avaliados; a) Integração Pecuária Floresta (IPF) b) Pastagem manejada 1 (PM), c) Pastagem manejada 2 (PM) e d) Eucalipto monocultura (EM)	46
Figura 9. Teor de carbono qualitativo, (HFIL) no perfil do solo em unidade adimensional (00-10; 10-20; 20-30; 30-40 e 40-60 cm) para os diferentes manejos avaliados; a) Integração Pecuária Floresta (IPF) b) Pastagem manejada 1 (PM)), c) Pastagem manejada 2 (PM) e d) Eucalipto monocultura (EM).	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros físicos e químicos das amostras de solo coletadas em cada sistema de manejos avaliados, Integração Pecuária Floresta (IPF), Pastagem manejada 1 (PM 1), Pastagem manejada 2 (PM 2) e Eucalipto monocultura (EM).	26
Tabela 2. Emissões de Gases de Efeito estufa (kg CO ₂ eq) para os sistemas de manejo avaliados: Integração Pecuária Floresta (IPF), Pastagem manejada 1 (PM 1), Pastagem manejada 2 (PM 2) para o período avaliado de 2020 a 2022, considerando emissão total dos animais, o uso de insumos e respectivas áreas.	35
Tabela 3. Pegada de carbono (kg CO ₂ eq Kg GPV ⁻¹ (Ganho de peso vivo) para os sistemas de manejo avaliados: Integração Pecuária-Floresta (IPF), Pastagem Manejada 1 (PM 1), Pastagem Manejada 2 (PM 2) para o período avaliado de 2020 a 2022.	40
Tabela 4. Emissões de Gases de Efeito Estufa e sequestro (kg CO ₂ eq) do Eucalipto Monocultura e do Sistema Integrado de Pecuária e Floresta (IPF).	41
Tabela 5. Análise de variância (ANOVA) para o estoque de carbono (EC) quantitativo e qualitativo.	50

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	8
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	11
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.1 - Introdução e Justificativa	15
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 - A agricultura e as mudanças climáticas globais	18
2.2 - Emissões de GEE no setor agrícola	18
2.3 - O papel da agricultura no processo de mitigação de GEE	20
2.4 – Matéria orgânica	20
2.5 – C na Matéria orgânica	21
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1 - Características da área de estudo	23
3.2 – Método utilizado para a interpolação do mapa de estoque de carbono	25
3.3 – Caracterização das áreas de estudo através das análises de solos	25
3.4 - Metodologia para estimativa das emissões de CO₂eq dos sistemas produtivos	27
3.4.1. Dados utilizados para o sistema integrado com pecuária e floresta (IPF)	27
3.4.2. Dados utilizados para pastagem manejada 1 (PM 1)	27
3.4.3. Dados utilizados para pastagem manejada 2 (PM 2)	28
3.4.4. Dados utilizados para eucalipto monocultura (EM)	28
3.5 – Descrição do consumo de óleo Diesel e da Energia elétrica	28
3.6 - Preparo de amostra de solo e análise LIBS e LIFS	29
	12

3.6.1 - Descrição dos equipamentos e instrumentos utilizados para determinar os estoques de carbono do solo e índice de humificação	29
3.6.2 - Preparação de amostras de solo para análise LIBS	30
3.6.3 - Método de referência para o sistema LIBS	30
3.7 - Metodologia para coleta de solo e determinação do estoque de carbono no solo (EC) e do índice de humificação (HFIL)	31
3.8 – Estoque de carbono na biomassa dos eucaliptos em IPF	33
3.9 – Estoque de carbono na biomassa dos eucaliptos monocultura	33
3.10 - Análise estatísticas	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1.1 - Emissão de GEE para o sistema IPF	36
4.1.2 - Emissão de GEE para o sistema PM 1	37
4.1.3 - Emissão de GEE para o sistema PM 2	37
4.2. Pegada de Carbono para os sistemas avaliados	38
4.3. Emissão e Sequestro de C (kg CO ₂ eq) nos sistemas que contém o componente arbóreo	41
4.4 – Energia elétrica e óleo diesel consumidos para a área total	41
4.5 – Crédito de carbono gerado na fazenda em estudo	42
4.6 - Avaliação do estoque de carbono (EC) no solo em função dos diferentes manejos	43
4.7 - Avaliação espacial do estoque de carbono do solo em função dos diferentes tipos de manejo	45
4.8 - Avaliação da concentração do carbono quantitativo em função do perfil do solo e dos diferentes tipos de manejo	45
4.9 - Avaliação da distribuição do carbono qualitativo (H _{FIL}) em função do perfil do solo e dos diferentes tipos de manejo	47
5.0 - Avaliação estatística usando análise de variância (ANOVA)	49
6.0 – Conclusões	50
	13

REFERÊNCIAS

51

APÊNDICE

62

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 - Introdução e Justificativa

Ao analisar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) por setores produtivos no cenário brasileiro, a pecuária lidera o ranking dos setores que mais emitem, com um valor de 496.040.351 tCO₂e (SEEG, 2023). Os sistemas integrados de produção, como a Integração Pecuária-Floresta (IPF), a Lavoura-Pecuária (ILP) e a Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), se destacam pela capacidade de melhorar a qualidade do solo, resultando na otimização dos insumos utilizados e proporcionando maiores rendimentos na produção (Magalhães et al., 2018). Apesar da matéria orgânica ser encontrada em pequenas frações no solo agrícola (de 1 a 5%), ela desempenha funções importantes, como ciclagem e disponibilidade de nutrientes, infiltração e armazenamento de água, solubilização de fertilizantes, complexação de metais, poder tampão, fluxos de gases para a atmosfera, resistência à erosão, agregação do solo e capacidade de troca de cátions (CTC), entre outros atributos (Bettiol et al., 2023).

A ILPF representa uma estratégia em que as produções agrícolas, pecuárias e ambientais se inter-relacionam, configurando um manejo eficiente para a produção sustentável e viabilidade econômica. O sinergismo entre sistemas produtivos diversificados otimiza os ciclos biológicos das plantas e dos animais, permitindo o uso consciente de insumos, resultando em eficiência econômica e minimização dos impactos ambientais (Reis et al., 2019).

Em pastagens degradadas (PD), observa-se uma diminuição da cobertura do solo e redução no número de novas plantas (provenientes da ressemeadura natural). Além disso, é possível observar uma diminuição na capacidade de superar os efeitos nocivos de pragas, doenças e plantas invasoras, culminando na degradação avançada dos recursos naturais devido a práticas inadequadas de manejo. Por fim, o pasto degradado potencializa a entrada de pragas, doenças e plantas invasoras. Diversos fatores contribuem para a degradação do pasto, incluindo erros na escolha da espécie forrageira, sobre pastoreio, desconsideração da capacidade de suporte e manejo inadequado de fertilizantes (BORGHI et al., 2018).

Para a recuperação das PD, o governo federal criou o Plano ABC+, que reúne esforços para diminuir o desmatamento e melhorar aspectos sociais, econômicos e ambientais, conciliando a segurança alimentar com a sustentabilidade ambiental. Esses esforços são realizados por meio de tecnologias como a ILPF, Recuperação de Pastagens Degradadas (RPD), Sistemas Agroflorestais (SAFs), Sistema Plantio Direto (SPD), Fixação Biológica do

Nitrogênio (FBN), Florestas Plantadas (FLP), Tratamento de Dejetos Animais (TDA) e outras técnicas de adaptação às mudanças climáticas (Manzatto et al., 2019). Segundo o Ministério da Agricultura e Pecuária, a meta do ABC+ para o período de 2021 a 2030 é recuperar 30 milhões de hectares de pastagem degradada, podendo reduzir 113,7 milhões Mg CO₂eq.

Os manejos envolvidos na produção do sistema ILPF promovem diversas melhorias nas condições físicas, químicas e biológicas do solo devido ao alto aporte de matéria orgânica. Isso potencializa a disponibilidade de nutrientes, diversifica a renda do produtor e auxilia na recuperação de áreas com PD (Milori et al., 2006; Tadini et al., 2021b).

O setor de Agricultura, Florestas e Uso do Solo (AFOLU) é responsável por cerca de 21% (10 a 12 Pg CO₂ eq ano⁻¹; 1 Pg = 10¹⁵ g) das emissões antrópicas globais de GEE, sendo fundamental aumentar o potencial de mitigação do dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera para alcançar as metas de redução estabelecidas (IPCC, 2019).

Nesse sentido, os sistemas integrados demonstram ser uma opção de manejo que apresenta uma gestão eficiente da terra, com otimização dos insumos para restaurar PD e compensar as emissões de GEE provenientes da produção de gado de corte (Cerri et al., 2007; Carvalho et al., 2010, 2014; Euclides et al., 2010; IPCC, 2014; Salton et al., 2014; de Figueiredo et al., 2017).

O solo desempenha um papel crucial no ciclo biogeoquímico do carbono, podendo armazenar até quatro vezes mais carbono do que a biomassa vegetal e três vezes mais do que a atmosfera (Carvalho et al., 2010). Os processos de sequestro de carbono que ocorrem nos solos incluem humificação, agregação e sedimentação (Lal, 2004; Minasny et al., 2017).

As técnicas espectroscópicas são ferramentas potenciais para a caracterização química e física do solo, sendo particularmente interessantes devido à sua boa resposta analítica e capacidade de monitoramento rápido, permitindo o mapeamento eficiente de extensas áreas agrícolas. Nos últimos anos, a espectroscopia de fluorescência induzida por laser (LIFS) aos poucos tem sido utilizada na agricultura. Essa técnica é sensível e considerada adequada para a determinação do grau de humificação da matéria orgânica no solo, apresentando a vantagem de ser não invasiva, não destrutiva e requerer o mínimo de preparo da amostra. No entanto, a LIFS está restrita a análises moleculares. Em alguns casos, é necessário realizar análises elementares do solo, como a determinação do teor de carbono, macronutrientes e micronutrientes presentes no solo, para otimizar a aplicação de fertilizantes e insumos agrícolas (Milori et al., 2006; Tadini et al., 2021b; Tadini et al., 2022).

Outra técnica interessante para a caracterização química do solo é a espectroscopia de emissão ótica com plasma induzido por laser (LIBS). Essa técnica é uma ferramenta analítica útil para uso laboratorial, não apenas devido à sua capacidade de avaliar qualquer elemento, mas também pela simplicidade do preparo da amostra. Explorando o potencial da técnica, a NASA, por meio do Rover Curiosity, destacou essa ferramenta analítica no cenário mundial para análises em sistemas embarcados. A maioria dos artigos na literatura sobre aplicações ambientais aborda análises de amostras sólidas, como solos e sedimentos (Bordonal et al., 2017; Ferreira et al., 2015; Glumac et al., 2010; Knadel et al., 2017; Segnini et al., 2014; Senesi & Senesi, 2016).

No caso do solo, a LIBS tem sido utilizada para determinar teores de carbono, nutrientes e contaminantes (Costa et al., 2020; Villas-Boas et al., 2016; Villas-Boas et al., 2020a). Em plantas, sua aplicação abrange a avaliação de déficits nutricionais (Pereira et al., 2010). Galbács (2015) destaca que as análises realizadas por LIBS podem reduzir custos e tempo para o agricultor, promovendo a racionalização do uso de insumos e contribuindo para padrões mais sustentáveis de produção. Isso se deve ao fato de ser uma técnica rápida e ambientalmente limpa, uma vez que não requer o uso de reagentes para o preparo da amostra.

Diante do cenário apresentado, este projeto de pesquisa tem como objetivo determinar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), a pegada de carbono e os estoques de C do solo para três sistemas de produção de gado de corte comercial no estado de Goiás e um sistema de silvicultura: (i) Integração Pecuária Floresta (IPF); (ii) Pastagem Manejada 1 (PM 1); (iii) Pastagem Manejada 2 (PM 2); e (iv) Eucalipto Monocultura (EM). Foram coletadas amostras de solos das quatro áreas mencionadas para determinar os estoques de carbono no solo através da tecnologia fotônica LIBS. Além disso, o índice de humificação (HFIL) do solo também foi determinado usando a técnica LIFS, sendo os dados utilizados referentes ao período de 2020 até 2022 para estimar as emissões de gases de efeito estufa dos cenários IPF, PM 1 e PM 2. O período considerado para avaliar as emissões e estoque de C na biomassa do eucalipto (EM) foi de 2012 a 2022.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - A agricultura e as mudanças climáticas globais

Diante do cenário evidenciado nas últimas décadas, pode-se afirmar que as mudanças climáticas significativas em nível global são resultado de ações antrópicas intensificadas que alteraram a composição da atmosfera. Segundo o observatório da NASA, a temperatura média global aumentou aproximadamente 1,1 °C entre os anos de 1975 e 2021 (IPCC, 2021). Alguns GEE, especialmente o CO₂ proveniente da combustão de combustíveis fósseis, e gases não-CO₂, como óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) e clorofluorcarbonetos (CFCs), contribuem significativamente para o aquecimento global (NOAA, 2020).

Estudos indicam que as mudanças climáticas podem influenciar significativamente os sistemas alimentares, especialmente devido à maior frequência de eventos climáticos extremos (IPCC, 2021). Enfrentar esses desafios requer ações de adaptação e mitigação em diferentes escalas por parte dos atores envolvidos (Bakucs et al., 2020; UNFCCC, 2018). Na agricultura, as mudanças climáticas têm impactado a produção e os insumos utilizados (Ferreira, 2024). As mudanças climáticas representam um problema global que já prejudicou a produtividade agrícola em diversos graus. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas alertou que a variabilidade da precipitação, temperatura e outros parâmetros climáticos provavelmente aumentará, elevando os riscos naturais (IPCC, 2019).

As emissões de (GEE do setor agropecuário correspondem a cerca de 24% das emissões antropogênicas globais (UNFCCC, 2018). As emissões de CH₄ na agricultura têm origem no solo inundado sob o plantio de arroz, na fermentação ruminal no sistema digestivo dos animais e na decomposição de fezes e resíduos de colheita em condições úmidas. O N₂O agrícola é emitido principalmente pelo uso de fertilizantes nitrogenados, esterco e composto orgânico. Globalmente, o aumento da atividade econômica e da população são fatores que impulsionam o crescimento das emissões de GEE na atmosfera, e prevê-se que esse aumento continuará de forma exponencial nos próximos anos (Ladha et al., 2022).

2.2 - Emissões de GEE no setor agrícola

Nas últimas décadas, as crises ambientais vivenciadas têm origem tanto em influências naturais quanto antrópicas. Essas crises não devem ser compreendidas apenas pelo viés ambiental, mas também pelo social, já que resultam de uma série de relações sociopolíticas

(UNFCCC, 2018). Até o momento, as pesquisas indicam que as mudanças climáticas são resultado de atividades antropogênicas (Cook et al., 2016; IPCC, 2021).

Pode-se observar que as mudanças climáticas impactam significativamente a economia dos países, causando uma diminuição da produtividade agropecuária e, conseqüentemente, uma menor oferta de alimentos nos mercados (FAO, 2020). Por outro lado, o sistema de produção agrícola gera quantidades consideráveis de GEE, principalmente CO₂, CH₄ e N₂O (Assad et al., 2019).

A produção agropecuária é uma das principais fontes de emissão de GEE, sendo, portanto, de suma importância o desenvolvimento de estratégias de agricultura de baixo carbono. Com a implementação dessas estratégias, estima-se um potencial de mitigação das emissões de GEE da ordem de 134 a 163 milhões de toneladas de CO₂ até o prazo final do compromisso em 2020 (BORGHI et al., 2018)

O setor de Agricultura, Florestas e Outros Usos da Terra (AFOLU) foi responsável por cerca de um quarto das emissões globais de GEE, configurando-se como o segundo setor mais crítico, após o de energia (Smith et al., 2014; UNFCCC, 2018; IPCC, 2019). Segundo estimativas do IPCC (2018), para limitar o aquecimento global a 2 °C, as emissões globais de GEE em 2030 devem ser aproximadamente 25% menores do que em 2017, e até 55% menores para atingir um aumento da temperatura média global de 1,5 °C. Para cumprir as metas climáticas globais, é essencial que o setor de mudança do uso da terra e o setor agropecuário adotem esforços ambiciosos de redução e mitigação de GEE em suas atividades (Bombelli et al., 2019).

A maior parte das emissões dentro do setor AFOLU é proveniente do setor de Mudança do Uso da Terra e Florestas, com o desmatamento respondendo por 56,3% (1 GtCO₂e) das emissões nacionais. Em seguida, com 33,7% de participação, o setor agropecuário aparece como o segundo maior emissor, totalizando 600,8 MtCO₂e emitidas em 2021. Dessa forma, os dois setores juntos correspondem a 90% das emissões (SEEG, 2023).

O setor AFOLU abrange atividades agrícolas que emitem GEE, bem como emissões e remoções resultantes de mudanças no uso da terra e/ou manejo que alteram os estoques de carbono da biomassa e dos solos (Smith et al., 2014; Brasil, 2023). O setor é único entre os demais, pois é responsável não apenas pelas emissões de GEE (CO₂, N₂O e CH₄), mas também pelo chamado "land sink", ou seja, pela remoção de CO₂ da atmosfera devido à capacidade dos ecossistemas que atuam como reservatórios de carbono (Jat et al., 2022). Apesar de as emissões de GEE da pecuária terem diminuído desde 1990, resultando em uma

redução de 20% na Europa (Del Prado et al., 2021), em 2018 o setor ainda representava 60% do total de emissões agrícolas a nível europeu (EU-NIR, 2020).

2.3 - O papel da agricultura no processo de mitigação de GEE

Devido ao impacto significativo nas mudanças climáticas, é vital reduzir as emissões de GEE para atender à meta de limitar o aquecimento global a 1,5 °C, conforme definido no Acordo de Paris (UNFCCC, 2018). Nesse contexto, torna-se necessário modificar as práticas agrícolas, pois a tendência é que as emissões de GEE do setor aumentem, em decorrência do crescimento da demanda por alimentos e da intensificação da produção agrícola. Assim, é indispensável discutir medidas de mitigação, desenvolver e expandir a agricultura regenerativa, buscando dissociar o crescimento populacional do aumento das emissões de GEE (FAO, 2020).

Com o apoio de redes colaborativas de pesquisa, foi desenvolvida uma lista de opções para a mitigação de GEE, abordando o problema sob diferentes perspectivas. A importância global da mitigação de GEE é amplamente reconhecida (de Sousa Alves et al., 2021). Algumas estratégias de mitigação já estão disponíveis e, portanto, podem ser implementadas rapidamente (Alves, 2022). O manejo dos animais pode afetar diretamente a fermentação entérica, como, por exemplo, alterações na dieta alimentar. Além disso, o gado pastoreando e/ou confinado impacta as emissões de N₂O, e as práticas de manejo de adubos minerais e orgânicos também influenciam as emissões desses gases (Lima, 2022).

Existe a possibilidade de reduzir em 30% as emissões de GEE em qualquer sistema, região ou clima, se os produtores adotarem as tecnologias e práticas atualmente empregadas pelos 10% com melhor desempenho (Barros et al., 2020). As emissões de CH₄ em campos agrícolas estão diretamente correlacionadas com solos orgânicos, frequentemente encharcados, sendo esses solos apontados como as principais fontes edáficas de CH₄ na agricultura (Richter et al., 2021). Portanto, destaca-se a importância do manejo agrícola, pois ele é fundamental para definir as condições do solo e, conseqüentemente, as emissões de GEE provenientes dos solos (Silva et al., 2022).

2.4 – Matéria orgânica

A matéria orgânica é composta por diversos elementos, sendo os mais comuns o carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo e enxofre (S). Comparado aos demais

elementos, o carbono é encontrado em maior quantidade, embora sua concentração na matéria orgânica seja variável. Apesar de constituir uma pequena fração da massa do solo, a matéria orgânica do solo (MOS) desempenha um papel crucial no controle da qualidade do solo, influenciando significativamente a produtividade das culturas agrícolas. Ela condiciona diversas propriedades físicas, químicas e físico-hídricas do solo, tamponando a acidez e servindo como substrato para a biota. Esse fenômeno ocorre porque a MOS interage com a água, com o ar e com os componentes minerais da fase sólida, além de atuar como fonte de nutrientes e energia para os microrganismos. Em sistemas de manejo conservacionista, a MOS pode ser uma estratégia importante para o sequestro e estabilização do carbono capturado da atmosfera pelas plantas, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas globais (Lal et al., 2015).

De acordo com Hayes e Swift (2020) a MOS contribui significativamente para a CTC, devido ao seu enorme potencial de retenção de cátions, especialmente em ambientes tropicais. Por isso, a presença da matéria orgânica é essencial para a construção da fertilidade dos solos tropicais. Assim, a agricultura em ambientes tropicais deve ter como pilares o aumento e a qualidade da matéria orgânica estocada no solo. No Brasil, há uma área expressiva de solos com fertilidade construída a partir do aumento da matéria orgânica, como ocorre em áreas sob sistema de plantio direto (SPD), integração lavoura-ILPF e sistemas agroflorestais (SAFs).

Devido à predominância do carbono na estrutura da MOS, este é o elemento geralmente utilizado para inferir o estoque e estudar a MOS, considerando seus diversos compartimentos. O carbono associado à MOS estabilizada (carbono na estrutura de substâncias húmicas) é a principal forma de carbono no solo. Esses compostos estabilizados, com alto grau de humificação, já foram processados pela biota do solo e são menos suscetíveis à decomposição, devido ao elevado grau de condensação química e à alta concentração de compostos aromáticos de elevada massa molar das moléculas húmicas presentes no solo (SEGNINI et al., 2019).

A decomposição da matéria orgânica ocorre por meio da interação entre o material orgânico e os organismos do solo, em um processo que transforma moléculas de menor massa molar em compostos de maior estabilidade química (OLK et al., 2019).

2.5 – C na Matéria orgânica

Segundo Bettiol et al. (2023), a representação do carbono solúvel em água (CSA) e suas associações representam menos que 1% do volume do total de carbono nos solos. Os

compostos de carbono dissolvido na fase líquida do solo possuem massa molar levemente reduzida, são polares, e, portanto, podem ser solvatados pela água, sua mobilidade no solo é extremamente elevada e, ainda, são capazes de complexar e, em algumas situações, tendo uma importante contribuição no solo que é imobilizar elementos tóxicos presentes na solução. Dentre os benefícios mencionados o carbono dissolvido em água pode tamponar a solução do solo e evitar desequilíbrios nutricionais, desta forma reduzindo potenciais danos que o excesso de nutrientes e elementos tóxicos poderiam causar às plantas.

O CSA, levando em conta sua maior mobilidade no solo, tem a possibilidade de auxiliar no transporte de nutrientes da solução do solo até a superfície das raízes das plantas. Dependendo de sua biotividade, a concentração do carbono disponível na solução do solo na forma de substâncias húmicas acarreta em aumento da absorção de nutrientes pelas plantas, influenciando na formação de hormônios e de forma indireta aumentando a profileração de raízes, portanto tendo como resultado o maior crescimento das plantas (Piccolo, 2001).

Não menos importante é o carbono associado à fase viva do solo e o carbono exsudado pelas raízes. Mais carbono associado à biomassa microbiana (C-BM) significa uma fase viva do solo mais ativa, conseqüentemente, com maior potencial, a longo prazo, para disponibilizar nutrientes mineralizáveis e/ou promover a solubilização e o aproveitamento no solo de insumos minerais de baixa reatividade, como apatitas, rochas silicatadas e pó de rocha contendo potássio. Além disso, o aumento do C-BM sinaliza que o manejo do solo é mais conservacionista e que há aporte regular de palhas e resíduos orgânicos, enfim, de substrato que suprem nutrientes e energia aos organismos do solo. Outros compostos orgânicos com nível intermediário de transformação/ estabilização também se encontram presentes e associados à MOS, que são denominados de matéria macrorrgânica. É importante observar que os compostos e compartimentos não estão interconectados porque os fluxos e processos não são totalmente compreendidos, e tampouco as formas químicas envolvidas em cada processo de transformação do carbono no sistema solo-planta-ar. Por isso, há a necessidade de se discutir o ciclo do carbono, suas formas e dinâmica no sistema solo-planta-ar visando melhor compreensão dos fluxos de carbono entre os pools do sistema solo-planta. A principal entrada de carbono no solo sob cultivo ou sob vegetação nativa é via planta, ou seja, é por meio da fotossíntese. O material vegetal da parte aérea, que senesce e compõe a serapilheira, em conjunto com o carbono exsudado pelo sistema radicular, que se renova no tempo ou senesce após a colheita, constituem os principais processos de aporte de carbono no sistema solo-planta (BETTIOL et al., 2023).

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Características da área de estudo

Os experimento foi conduzido em uma fazenda, localizada em Serranópolis, no Estado de Goiás, com coordenadas Latitude: 18°09'10,14" S e Longitude: 52°09'03,96". A área total é de 3.099,67 ha, predominando solos classificados como Argissolo Vermelho Eutrófico e Argissolo Vermelho Distrófico (IBGE, 2012), conforme a Figura 1, com uma precipitação anual (INMET, 2022) indicada na Figura 2.

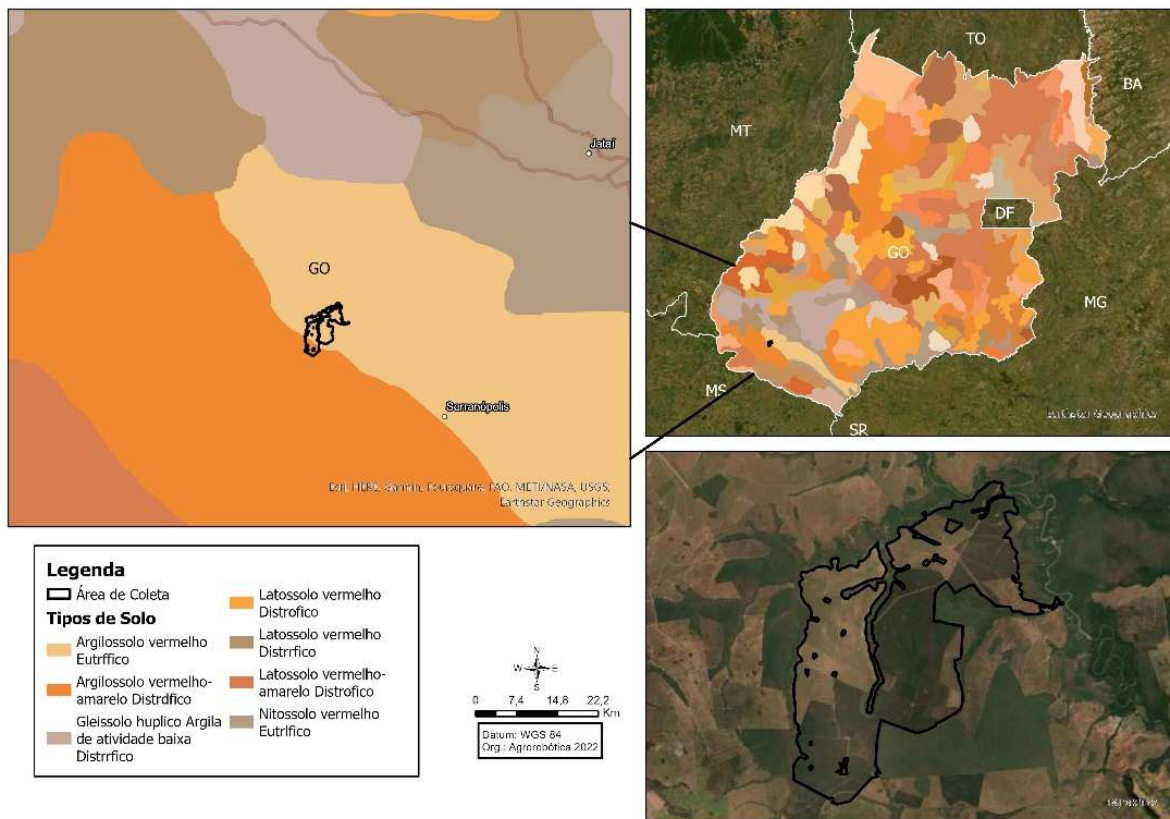


Figura 1. Mapa de pedologia para a localização da área de estudo circundada em preto que está localizada em Serranópolis - GO, tendo os 4 cenários avaliados: Integração Pecuária Floresta (IPF), Pastagem manejada 1 (PM 1), Pastagem manejada 2 (PM 2) e Eucalipto monocultura (EM).

Os cenários para manejos de pastos, produção de bovinos de corte e silvicultura avaliados no presente estudo são descritos a seguir:

- **Integração Pecuária-Floresta (IPF)**, em uma área de 298,2 ha, composta por *Brachiaria decumbens* e eucalipto da variedade VM01. Esse cenário pode ser caracterizado quimicamente pelas análises de solo, conforme a Tabela 1, apresentando saturação de base (V%) de 42,75% e saturação de alumínio (m%) de 32,85%.
- **Pastagem Manejada 1 (PM 1)**, com uma área de 317,69 ha, onde se encontra pastagem de *Brachiaria decumbens* com manejo inferior ao da Pastagem Manejada 2 (PM 2), apresentando V% de 25,95% e m% de 41,05%.
- **Pastagem Manejada 2 (PM 2)**, com uma parcela de 337,13 ha, composta por gramíneas como *Brachiaria brizantha* MG 5, *Panicum maximum* – Massai e *Brachiaria decumbens* – Brasilisk. Este cenário tem um manejo superior ao PM 1, com V% de 38,38% e m% de 27,46%.
- **Eucalipto Monocultura (EM)**, com uma área de 556,03 ha, incluindo variedades como VM01, I144, GG100/I1224, I144/GG100 e CITRIODORA/I, totalizando uma área produtiva de 1.509,03 ha. Esse cenário é caracterizado por V% de 27,94% e m% de 41,92%.

Todos os cenários estudados apresentam solos arenosos, com uma textura variando entre 855,16 e 896 g/kg de areia. Nos tratamentos PM 1 e PM 2, as pastagens manejadas são definidas como aquelas que recebeu algum tipo de aplicação de insumos como calcário para correção da acidez do solo, aplicação de fertilizantes ou controle de invasoras e pragas. O PM 2 passou por intervenções com fertilizantes e corretivos, melhorando o sistema para proporcionar melhores condições de engorda.

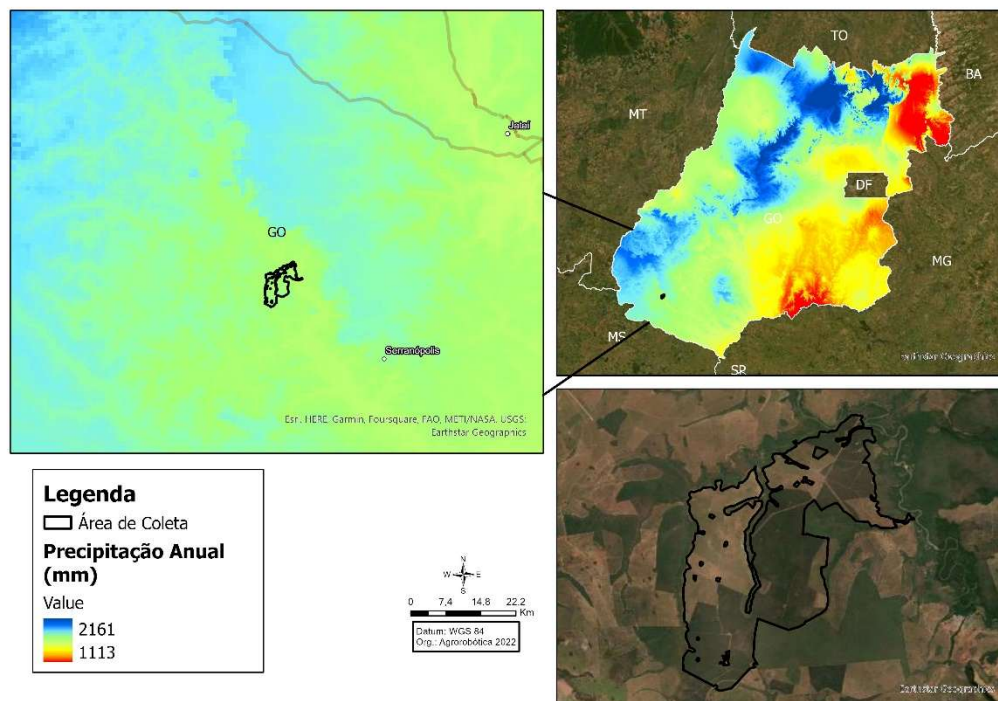


Figura 2. Mapa de precipitação anual para a localização da área de estudo circundada em preto que está localizada em Serranópolis - GO, tendo os 4 cenários avaliados: Integração Pecuária Floresta (IPF), Pastagem manejada 1 (PM 1), Pastagem manejada 2 (PM 2) e Eucalipto monocultura (EM).

3.2 – Método utilizado para a interpolação do mapa de estoque de carbono

Interpolação feita por meio de Krigagem ordinária, através do Plugin Smart-Map, instalado no Software QGIS, software de Geoprocessamento e utilizando o modelo linear da ferramenta. Desta forma obtivemos o mapa de estoque de carbono, o qual a interpolação é baseada através de cada ponto amostral georreferenciado e amostrados nas áreas em estudos.

3.3 – Caracterização das áreas de estudo através das análises de solos

Os parâmetros físicos e químicos apresentados na Tabela 1 são de amostras deformadas de 0-20 cm de profundidade de cada sistema de manejo avaliado: IPF, PM 1, PM 2 e EM. O objetivo é compreender a variabilidade espacial e as similaridades entre esses sistemas.

Tabela 1. Parâmetros físicos e químicos das amostras de solo coletadas em cada sistema de manejos avaliados, Integração Pecuária Floresta (IPF), Pastagem manejada 1 (PM 1), Pastagem manejada 2 (PM 2) e Eucalipto monocultura (EM).

Parâmetros	Sistemas							
	IPF		PM 1		PM 2		EM	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
Areia (g kg ⁻¹)	855,2	864,9	887	883,8	878	887,1	896	894,8
Silte (g kg ⁻¹)	66,9	61	49,2	48,4	64,6	61,6	62,5	55
Argila (g kg ⁻¹)	77,8	73,6	63,6	67,5	57,4	51,4	41,6	50,6
CTC (cmolc dm ⁻³)	3,1	2,7	2,7	3,3	3,3	3,0	3,4	3,7
Saturação de Alumínio (m %)	11,7	32,9	29,2	41,1	14,5	27,5	15,06	41,9
Saturação de Base (V %)	42,8	23,5	26,0	17,5	38,4	27,5	27,9	8,0
Ca (cmolc dm ⁻³)	0,9	0,4	0,4	0,3	0,9	0,5	0,6	0,3
Mg (cmolc dm ⁻³)	0,4	0,2	0,3	0,2	0,4	0,3	0,3	0,2
P (mg dm ⁻³)	5,8	*	3,7	*	7,5	*	12,0	*
K (cmolc dm ⁻³)	0,04	0,02	0,05	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02

3.4 - Metodologia para estimativa das emissões de CO_{2eq} dos sistemas produtivos

Os dados foram coletados para o período de dois anos para os sistemas IPF, PM 1 e PM 2, 01/09/2020 a 01/09/2022 e para EM 01/09/2012 a 01/09/2022. O inventário de GEE utilizou os métodos de cálculos do IPCC 2006, que leva em consideração as variáveis: tipos de cultivo, produtividade, consumo de litro de diesel, fertilizantes, calcário, fermentação entérica, deposição de estrume, consumo elétrico. Após a coleta dos dados foi realizada a formulação do inventário através do software (IPCC, Inventory Software) e foram usados os seguintes potencial, de aquecimento global (PAG) de 25 para CH₄, 298 para N₂O (IPCC, 2006). Todos os cálculos que norteiam o inventário de GEE estão disponíveis no apêndice 1.

3.4.1. Dados utilizados para o sistema integrado com pecuária e floresta (IPF)

O sistema IPF é composto por eucaliptos da variedade VM01, plantados em um espaçamento de 12,00 x 4,00 x 1,70 m, com uma média de 736 plantas por hectare, integrados ao pasto manejado de *Brachiaria*, em uma área total de 298,18 hectares. O rebanho foi composto por bovinos da raça Nelore, sendo 139 machos e 348 fêmeas, totalizando 487 animais, que permaneceram na área até o abate, realizado após dois anos. Foram utilizados insumos como calcário, aplicado à taxa de 2.000 kg ha⁻¹ ano⁻¹, e fertilizante nitrogenado, com aplicação de 73 kg ha⁻¹ ano⁻¹. Estima-se que o peso dos animais ao entrarem no IPF seja de 200 kg de peso vivo (PV), e, após 27 meses ou 2,25 anos, eles são abatidos com 555 kg PV, totalizando uma produção de 172.885 kg de Ganho de Peso Vivo (GPV) ou 76.837,78 kg GPV ano⁻¹ ou 257,8 kg GPV ha⁻¹ ano⁻¹.

3.4.2. Dados utilizados para pastagem manejada 1 (PM 1)

Para a área em questão, há uma pastagem de *Brachiaria decumbens* em nível de degradação moderado, tendo solo descoberto de gramínea em algumas regiões dentro do cenário retratado, presença de 293 animais, sendo todas fêmeas. Não houve nenhuma aplicação de calcário ou fertilizante nitrogenado. Estima-se que o peso do animal ao entrar no PM 1 seja em média de 200 kg de peso vivo (PV), e após 27 meses ou 2,25 anos, eles são abatidos com média de 555 kg PV, totalizando uma produção de 104.015,00 kg de Ganho de Peso Vivo (GPV) ou 46.228,89 kg GPV ano⁻¹ ou 145,56 kg GPV ha⁻¹ ano⁻¹.

3.4.3. Dados utilizados para pastagem manejada 2 (PM 2)

Para o sistema intensivo de produção de bovinos da raça nelore em PM, sendo 159 fêmeas e 35 machos, totalizando 194 animais, que permaneceram na área dois anos até o abate. Considerando uma dosagem de 1.000 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de calcário e 35,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de fertilizante nitrogenado. A pastagem manejada é composta por variedades de *Brachiaria brizantha* MG 5, *Panicum maximum* – *Massai* e *Brachiaria decumbens* – *Brasilisk*, a densidade de plantio foi de 8 kg ha⁻¹, tendo uma área total de 337,13 hectares. Estima-se que o peso do animal ao entrar no PM 2 seja em média de 200 kg de peso vivo (PV), e após 27 meses ou 2,25 anos, eles são abatidos com a média de 555 kg PV, totalizando uma produção de 68.870,00 kg de Ganho de Peso Vivo (GPV) ou 30.608,89 kg GPV ano⁻¹ ou 90,80 kg GPV ha⁻¹ ano⁻¹.

3.4.4. Dados utilizados para eucalipto monocultura (EM)

Para o sistema de EM com dosagens de aplicações de calcário 1.000 kg ha⁻¹ ano⁻¹ e N 146 kg ha⁻¹ ano⁻¹, os insumos mencionados foram aplicados nos três primeiros anos de implantação da cultura. O Sistema é composto por variedades como VM01, I144, GG100/I1224, I144/GG100, CITRIODORA/I com espaçamento médio de 3,50 x 2,00, portanto tendo uma densidade de plantas de 1.428 plantas ha⁻¹.

3.5 – Descrição do consumo de óleo Diesel e da Energia elétrica

O consumo médio anual de energia elétrica e óleo diesel é de 38.550,99 kWh e 47.808 litros, respectivamente. A energia elétrica é utilizada para abastecer as operações de tratamento de madeira, enquanto o óleo diesel é utilizado nas atividades agrícolas da propriedade.

3.6 - Preparo de amostra de solo e análise LIBS e LIFS

3.6.1 - Descrição dos equipamentos e instrumentos utilizados para determinar os estoques de carbono do solo e índice de humificação

A Figura 3 mostra o sistema LIBS utilizado neste estudo. O sistema LIBS é composto pelo laser pulsado de alta energia emitindo no modo fundamental de 1064 nm, 20 mJ e 10 Hz e um espectrômetro de faixa espectral de placa que varia do ultravioleta profundo (UV) ao infravermelho médio (IR), entre 180 nm a 950 nm, com resolução de 0,1 nm e equipado com um arranjo de dispositivo acoplado à carga (CCD).

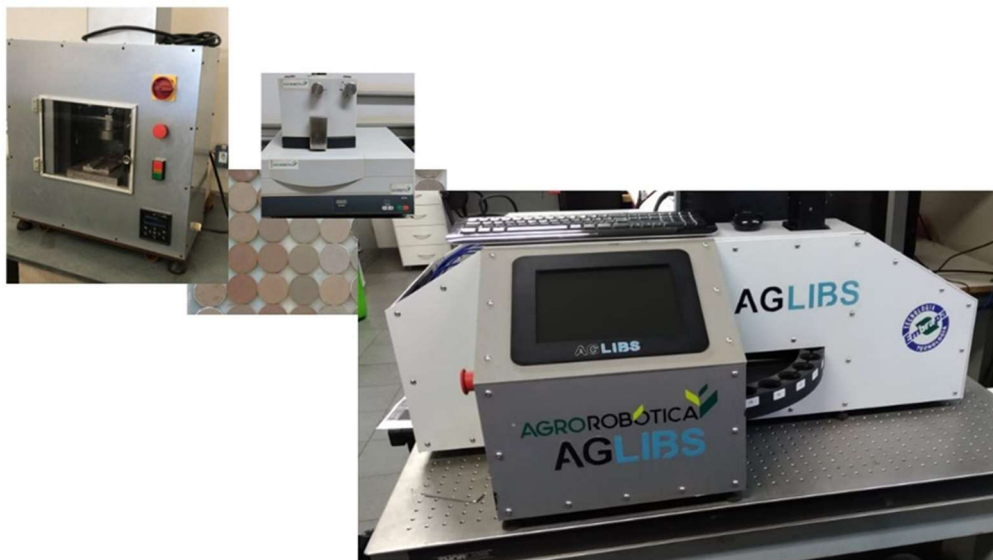


Figura 3. Sistema LIBS utilizado no estudo.

Os pulsos de laser de alta energia são focados na amostra para gerar um plasma e excitar termicamente o analito para níveis de energia mais elevados. À medida que o plasma esfria, os átomos decaem para níveis de energia mais baixos emitindo radiação eletromagnética, que é coletada por um telescópio, converge a luz para um feixe de fibras e a conduz no espectrômetro. Para cada medição, uma sucessão de três pulsos de laser foi disparada sobre a amostra de solo. o primeiro foi usado para limpar a superfície da amostra, os dois disparos restantes são acumulados e um espectro médio foi computado e armazenado. Cada pellet de solo foi medido aproximadamente 60 vezes para minimizar as incertezas devido à heterogeneidade da matriz. Todas as medições foram realizadas no ar à pressão atmosférica.

Para o sistema LIFS utilizamos um sistema portátil projetado para compactar todo o aparato de detecção e permitir a utilização do equipamento fora das condições do laboratório. Esse equipamento foi utilizado para a avaliação da qualidade da MOS. O sistema utiliza um *laser* de diodo emitindo em 405 nm, com potência máxima de 50 mW, acoplado a um cabo óptico composto por seis fibras ópticas que excitam a amostra e uma fibra óptica central que coleta o sinal de fluorescência do solo. Cada amostra foi analisada com cinco repetições para a obtenção do índice de humificação médio. A janela espectral foi de 475 a 800 nm, com intensidade de 0-4000, tempo de integração 500 ms, box car igual a 4 e número de média igual a 5.

3.6.2 - Preparação de amostras de solo para análise LIBS

A determinação quantitativa usando a LIBS tem uma alta dependência da matriz, então a preparação da amostra é considerada uma etapa essencial em todo o processo de análise. Nesse estudo, as amostras foram secas em terra seca fina ao ar até massa constante, por um tempo de 48 horas. Em seguida, as amostras foram trituradas e homogeneizadas em moinho automatizado para redução de partículas até 2mm. Posteriormente, as amostras foram submetidas a um processo de remoção de resíduos vegetais. Finalmente, os pellets de solo foram produzidos a partir de prensagem automatizada. Esses pellets foram inseridos no sistema automatizado LIBS, como mostra a Figura 3. Seu tamanho, peso e altura foram personalizados e seguiram protocolos rigorosos para garantir a reprodutibilidade de medidas em larga escala. Além disso, a preparação de amostras tem uma capacidade de produção de 1000 amostras por dia.

3.6.3 - Método de referência para o sistema LIBS

Todas as amostras de solo utilizadas neste estudo tiveram o teor de carbono (g kg^{-1}) determinado pelo analisador de combustão seca CHNS/O Perkin Elmer 2400 Série II da Embrapa Instrumentação, seguindo métodos padronizados. Os parâmetros físicos (% argila, %silte e % areia) desses solos foram caracterizados pelo método da pipeta e selecionados de acordo com as cinco classes amplamente utilizadas pela Embrapa (Claessen et al., 1997): arenoso, silte, médio, argiloso e muito argiloso, definidos pela quantificação das frações areia, argila e lodo de areia. De acordo com os valores obtidos pelas metodologias de referência, os teores de carbono das amostras utilizadas variam de 3,5 a 5,0 g kg^{-1} . Os valores de textura variaram: areia de 635 a 919 g kg^{-1} ; argila 9 a 360 g kg^{-1} .

3.7 - Metodologia para coleta de solo e determinação do estoque de carbono no solo (EC) e do índice de humificação (H_{FIL})

As amostras de solo foram coletadas a uma profundidade de até 60 cm, em diferentes camadas em (0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-60) (Figura 4). Foram coletadas cerca de 300 g de solo para cada amostra e o material coletado foi levado ao laboratório da Agrorobótica em São Carlos. Foram coletadas 620 amostras deformadas na área agricultável. Para cada ponto amostral foi coletado 5 amostra deformadas. Dentro deste ponto amostral o protocolo consiste em retirar uma amostra de cada estrato em 9 subpontos dentro do ponto amostral, sendo separadas em baldes pelas profundidades trabalhadas. Em cada balde ocorreu a homogeneização destas amostras e após este processo foram destinadas para um saco plástico com as informações de cada amostra.

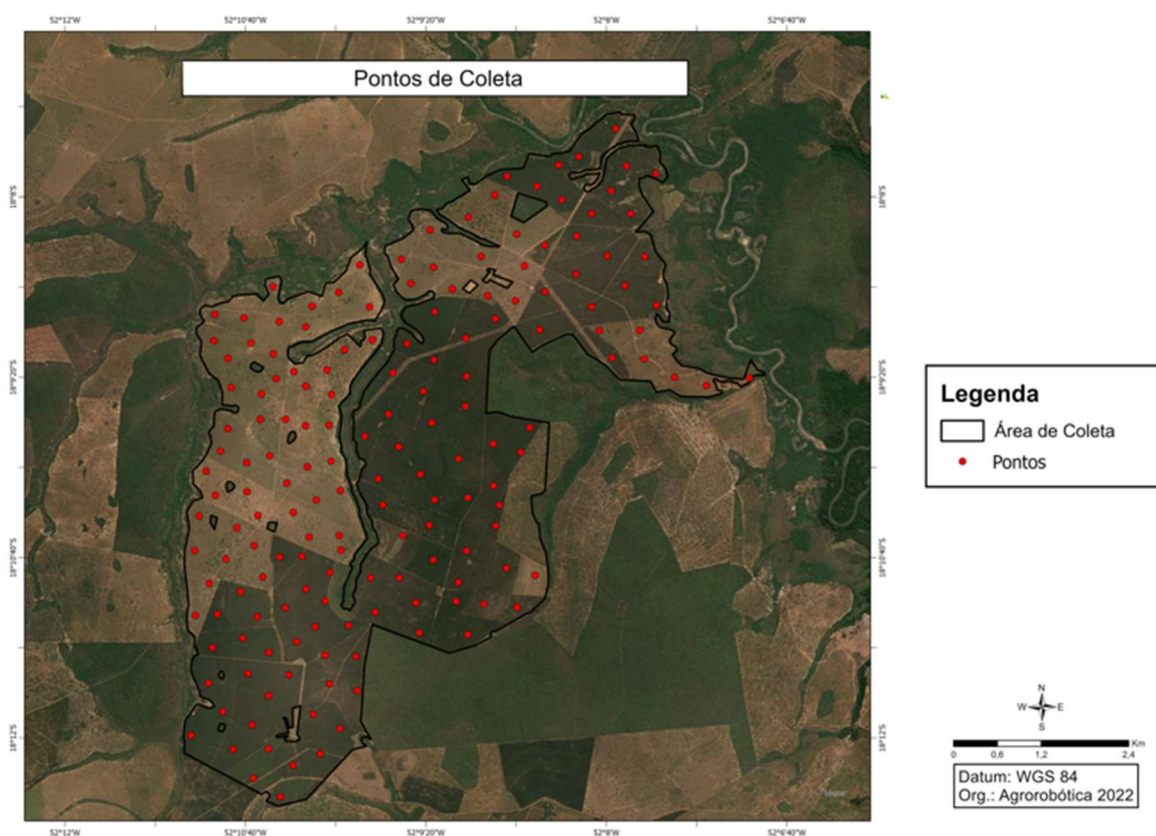


Figura 4. Mapa com os pontos amostrais georreferenciados com a localização da área de estudo circundada em preto que está localizada em Serranópolis - GO, tendo os 4 cenários avaliados: Integração Pecuária Floresta (IPF), Pastagem manejada 1 (PM 1), Pastagem manejada 2 (PM 2) e Eucalipto monocultura (EM).

Amostras volumétrica para determinação da densidade do solo foram realizadas nos estratos de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40, utilizando-se cilindros de aço inox (91 cm³), totalizando em cerca de 496 amostras indeformadas na área agricultável e 12 na área de mata, com cerca de 150 g de solo em cada uma das amostras. As amostras deformadas foram analisadas pela LIBS para determinação de carbono, e posterior determinação do EC do solo pela metodologia baseada na Equação 1:

$$C_{stock} = \frac{OC \times D_{soil} \times E}{10} \quad (1)$$

Onde:

C_{stock} é o EC no solo (Mg ha⁻¹);

OC é o teor de carbono do solo (g kg⁻¹);

D_{soil} é a densidade do solo (g cm⁻³);

e **E** é a espessura da camada de solo (m).

A densidade do solo, não deformadas e coletadas por um anel volumétrico com um tamanho médio de 4,8 cm de diâmetro interno e 5,0 cm de altura, para o cálculo será considerado a massa equivalente da mata, portanto desconsiderando a compactação da área estudada (Claessen et al., 1997).

A equação 1 é amplamente utilizada para o cálculo de EC, no entanto ainda é insuficiente para avaliarmos o EC no solo, necessariamente leva em conta uma camada/profundidade fixa (Sisti et al., 2004). Portanto se uma camada onde há maior compactação do que outra, conclui-se que a camada mais compactada possui maior massa de solo.

$$M_{solo} = D_s \times L \times 10.000 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$$

Onde:

M_{soil} = Massa de solo por unidade de área (Mg ha⁻¹);

D_s = Densidade do solo em Mg m⁻³;

L = espessura da camada em metros (m).

Com base na literatura Sisti et al. 2004 e do objetivo firmado no protocolo da rede PECUS (Pecuária sustentável) os estoques de carbono requerem ser corrigidos, usando-se como referência a massa de solo equivalente sob vegetação nativa em cada sistema que for avaliado, por tanto, é tido como referência a compactação do solo na mata nativa.

O H_{FIL} proposto por Milori e colaboradores (2006) baseado no índice de humificação é definido conforme a equação 2 abaixo, onde A_f corresponde a área de fluorescência sob o espectro e C_t é o teor de carbono total, que no estudo foi determinado pela LIBS. A partir da normalização da área de fluorescência pelo teor de carbono da amostra é enunciado o grau de humificação da MO ou H_{FIL}.

$$H_{FIL} = \frac{A_f}{C_t} \quad (2)$$

3.8 – Estoque de carbono na biomassa dos eucaliptos em IPF

Com a finalidade da compreensão do poder de mitigação do Sistema Integrado, o valor utilizado para os cálculos, foram retirados do documento publicado pelo MAPA que é a “coletânea de fatores de emissão da agricultura”. Portanto segundo Pezzopane et al. (2020, p. 126) em relação aos estoques de carbonos da biomassa aérea do eucalipto, foi considerado o valor 5,2 t C ha⁻¹ ano⁻¹.

3.9 – Estoque de carbono na biomassa dos eucaliptos monocultura

A Análise do potencial de mitigação do eucalipto monocultura foi através de valores de referência publicados por Ronquim, 2007, desta forma o valor considerado foi de 5,8 t C ha⁻¹ ano⁻¹.

3.10 - Análise estatísticas

A avaliação estatística foi realizada por meio da análise de variância (ANOVA) avaliando o valor p (probabilidade estatística), para estimar a significância dos efeitos principais e das interações entre os estoques de carbono, carbono quantitativo e H_{FIL} de cada sistema de manejo avaliado. Para valores de p menores que 0,05 (p<0,05) o efeito é estatisticamente significativo, sendo que 0,05 é o nível de significância mais utilizado e corresponde a uma decisão tomada a um nível de confiança de 95%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Emissões de GEE para os sistemas de produção avaliados, Integração pecuária floresta (IPF), Pastagem manejada 1 (PM 1), Pastagem manejada 2 (PM 2) e Eucalipto Monocultura (EM).

Entre os valores coletados dos quatro sistemas que compõem o estudo, a aplicação de fertilizantes nitrogenados variou entre 35,5 e 73 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹. As doses de calagem variaram de 500 a 1000 kg ha⁻¹ ano⁻¹. A quantidade de animais nos sistemas variou de 194 a 487. Entre os resultados obtidos, a menor emissão por hectare foi de 1.432,7 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto o maior valor registrado foi de 3.508,4 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ como pode-se notar na tabela 2.

Tabela 2. Emissões de Gases de Efeito estufa (kg CO₂eq) para os sistemas de manejo avaliados: Integração Pecuária Floresta (IPF), Pastagem manejada 1 (PM 1), Pastagem manejada 2 (PM 2) para o período avaliado de 2020 a 2022, considerando emissão total dos animais, o uso de insumos e respectivas áreas.

Sistema	Quantidade		Insumos (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)		Emissões (kg CO ₂ eq ano ⁻¹)					
					kg CO ₂ eq animal ano ⁻¹			kg CO ₂ eq ha ⁻¹ ano ⁻¹		
					CH ₄ Entérico (3)	N ₂ O dos dejetos em pastagem (4)	*Emissão total por animal	N ₂ O N fertilizante (5)	Calcário (6)	**Emissão total por hectare
IPF	298,1	487	73,0	1.000	1.300	317,44	1.617,4	658,00	476,7	3.777,1
PM 1	317,6	293	0,0	0	1.400	317,44	1.717,4	0	0	1.584,4
PM 2	337,1	194	35,5	500	1.400	317,44	1.717,4	320,01	238,3	1.546,7

*Emissão total por animal = (3) + (4)

**Emissão por hectare = ((Emissão total por animal x (2)) / (1)) + (5) + (6))

4.1.1 - Emissão de GEE para o sistema IPF

O fator de emissão de CH₄ para fermentação entérica adotado na IPF foi de 52 kg CH₄ por animal por ano (animal⁻¹ ano⁻¹), baseado em dados experimentais de gado de corte pastando sob condições climáticas semelhantes, em pastagens bem manejadas no Brasil (DEMARCHI et al., 2003). O cenário foi composto por 487 animais em uma área de 298,1 hectares, com uma taxa de lotação de 1,63 animais por hectare.

A emissão total de GEE foi de 3.777,1 kg CO₂eq por hectare por ano (ha⁻¹ ano⁻¹) (tabela 2), sendo que a principal fonte de emissão foi a fermentação entérica dos animais, com 1.300 kg CO₂eq animal⁻¹ ano⁻¹. Gontijo Neto et al. (2018), em estudo realizado no cerrado brasileiro, localizado em Minas Gerais, concluiu que no sistema ILPF, para 1 unidade animal (UA), a emissão entérica resultou em 1.850 kg CO₂eq, considerando o fator de emissão de 66 kg CH₄ animal⁻¹ ano⁻¹ e o potencial de aquecimento global do CH₄ igual a 28 vezes o potencial do CO₂. Em outro estudo, Silva et al. (2021), em ILPF no sudoeste paranaense, afirmou que a emissão entérica para 1 UA foi de 1.880 kg CO₂eq, utilizando os mesmos parâmetros mencionados por Gontijo Neto et al. (2018).

A contribuição da emissão de N₂O dos dejetos no IPF em nosso trabalho foi de 317,44 kg CO₂eq animal⁻¹ ano⁻¹. Segundo Cardoso et al. (2012), para calcular as emissões originárias dos dejetos em pastagem e aplicar o fator de emissão encontrado em seu ensaio, considerou-se o que Braz et al. (2002) afirmou que um animal de 450 kg de peso vivo excreta, na forma de fezes, 21,35 kg de N ano⁻¹. Aplicando o fator de emissão encontrado no ensaio, o valor das emissões originárias dos dejetos seria de 64,07 kg CO₂eq, utilizando um potencial de aquecimento global do CH₄ igual a 25 vezes o potencial do CO₂, valor inferior ao encontrado no presente estudo. Já a emissão proveniente dos fertilizantes nitrogenados aplicados no sistema produtivo em estudo contribuiu com 658 kg CO₂eq por hectare por ano, e a aplicação de calcário, com 476,6 kg CO₂eq por hectare por ano (Tabela 2). As dosagens de fertilizantes nitrogenados e corretivos aplicados no IPF foram, em média, 73 kg N por hectare por ano e 1.000 kg de calcário por hectare por ano, respectivamente. Em um estudo realizado por de Figueiredo et al. (2017), foi demonstrado que, no ILPF, em 10 anos, o fertilizante nitrogenado contribuiu com 4.776 kg CO₂eq por hectare, resultando em uma média de 477,6 kg CO₂eq por hectare por ano, e a aplicação de calcário com 2.860 kg CO₂eq por hectare em uma escala temporal de 10 anos, resultando em média 286 kg CO₂eq por hectare por ano.

4.1.2 - Emissão de GEE para o sistema PM 1

O fator de emissão de CH₄ para fermentação entérica adotado em PM1 é aproximadamente 7% superior ao utilizado em ILPF e PM. Portanto, o fator de emissão padrão recomendado pelo IPCC (2006) para bovinos de corte pastando em pastagens extensivas na América Latina é de 56 kg CH₄ animal⁻¹ ano⁻¹.

O cenário foi composto por 293 animais em uma área de 317,6 hectares, com uma taxa de lotação de 0,92 animais por hectare. A emissão total de GEE na PM 1 foi de 1.584,4 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ (tabela 2), sendo que a emissão proveniente da fermentação entérica, contribuiu com 1.400 kg CO₂eq animal⁻¹ ano⁻¹. Em um estudo realizado por Cardoso et al. (2012), que comparou diversos cenários, incluindo a PM 1 e diferentes categorias de animais como touros, vacas e bezerros, foi relatado um fator médio de emissão de metano na fermentação entérica de 67,6 kg CH₄ animal⁻¹ ano⁻¹. Ao calcular a emissão de CH₄ na fermentação entérica utilizando um potencial de aquecimento global 25 vezes superior ao do CO₂, o valor obtido foi de 1.690 kg CO₂eq por hectare, superior ao valor encontrado no presente estudo.

De Figueiredo et al. (2017) usou valores semelhantes tanto para o fator de emissão (56 kg CH₄ animal⁻¹ ano⁻¹) quanto para o potencial de aquecimento global, 25 vezes o potencial do CO₂, em comparação com o presente estudo, resultando em um valor final igual (1.400 kg CO₂eq animal⁻¹ ano⁻¹). A emissão dos dejetos em pastagem no sistema PM 1 contribuiu com um valor de 317,44 kg CO₂eq animal⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 2).

4.1.3 - Emissão de GEE para o sistema PM 2

O fator de emissão de CH₄ para fermentação entérica adotado na PM 2 foi semelhante ao do PM 1, sendo de 56 kg CH₄ animal⁻¹ ano⁻¹ (DEMARCHI et al., 2003). O cenário foi composto por 194 animais em uma área de 337,1 hectares, com uma taxa de lotação de 0,58 animais por hectare.

A emissão total de GEE para PM 2 foi de 1546,7 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ (tabela 2), sendo que a principal fonte de emissão foi a fermentação entérica dos animais, com 1.400 kg CO₂eq animal⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 2). Na revisão de literatura realizada por Cardoso et al. (2012), discutida na análise dos resultados do ILPF, o fator médio de emissão de metano na fermentação entérica para uma unidade animal em PM é de 54,8 kg CH₄ animal⁻¹ ano⁻¹. Ao calcular a emissão de CH₄ na fermentação entérica utilizando um potencial de aquecimento global 25 vezes superior ao do CO₂, o valor obtido foi de 1.370 kg CO₂eq por

hectare, inferior ao valor encontrado no presente estudo.

A contribuição da emissão de N₂O dos dejetos no PM 2 foi de 317,44 kg CO₂eq 56 kg CH₄ animal⁻¹ ano⁻¹. A emissão dos fertilizantes nitrogenados aplicados nesse sistema produtivo em estudo contribuiu com 320,01 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, e a aplicação de calcário com 238,33 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 2). A dosagem de fertilizantes nitrogenados aplicada na PM 2 foi, em média, de 35,5 kg de N ha⁻¹ ano⁻¹, e de calcário, 500 kg ha⁻¹ ano⁻¹. Um estudo realizado por De Figueiredo et al. (2017) mostrou que, na PM, em 10 anos, o fertilizante nitrogenado contribuiu com 5.995 kg CO₂eq por hectare, resultando em uma média de 599,5 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, e a aplicação de calcário contribuiu com 2.860 kg CO₂eq ha⁻¹ em uma escala temporal de 10 anos, resultando em uma média de 286 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹.

4.2. Pegada de Carbono para os sistemas avaliados

Considerando a capacidade de suporte animal por área para cada sistema avaliado, IPF apresentou 1,63 animais ha⁻¹, sendo caracterizado pelo uso de adubação nitrogenada e aplicação de calcário, o qual resultou em uma emissão total de GEE de 1.125.955,17 kg CO₂eq ano⁻¹ quando comparado com PM 1 (503.210,11 kg CO₂eq ano⁻¹) e PM 2 (521.402,63 kg CO₂eq ano⁻¹) (Tabela 3).

Conforme parâmetros apresentados pela empresa, IPF apresentou um total de ganho de peso vivo (GPV) dos animais para área toda em 2,25 anos de adoção de 172.885 kg, resultando assim em uma pegada de C de 14,7 kg CO₂eq kg⁻¹ GPV, sem considerar possíveis potenciais de sequestro de C no solo e biomassa em IPF. Considerando um possível sequestro de carbono na biomassa do tronco dos eucaliptos em IPF de 5,2 t C ha⁻¹ ano⁻¹ (Pezzopane et al., 2020, p. 126), através do estudo mencionado, a estimativa é que sequestro de carbono em IPF seria de 5.673.439,2 kg CO₂eq ano⁻¹ ou 5.673,4 tCO₂eq ano⁻¹, responsável não apenas pelo abatimento de todas as emissões de GEE em IPF, mas oferecendo a possibilidade da redução da pegada de C para -59,18 kg CO₂eq kg⁻¹ GPV, sem considerar o potencial de sequestro de carbono do solo.

Para PM 1, apesar de apresentar maiores emissões totais de GEE, esse sistema apresentou uma pegada de C de 10,9 kg CO₂eq kg⁻¹ GPV e o sistema de produção PM 2 17 kg CO₂eq kg⁻¹ GPV e ao calcular a pegada da junção dos três sistemas, temos 10,6 kg CO₂eq kg⁻¹ GPV. Estas diferenças podem ser resultantes da quantidade de animais por área ser inapropriada, resultando maiores emissões totais por área onde se tem maior quantidade de animais.

De Figueiredo et al. (2016) calcularam o balanço de GEE que são as emissões menos os sumidouros e a pegada de carbono na produção de gado de corte em três diferentes cenários de sistemas de produção com pastagens de *Brachiaria* no Brasil: PD, PM e ILPF. Ao longo de dez anos, a maior emissão total foi observada nas PM (84.541 kg CO₂eq por hectare), seguida pelo sistema ILPF (64.519 kg CO₂eq por hectare) e, por último, pelas PD (8.004 kg CO₂eq por hectare). À primeira vista, isso sugere que os sistemas mais intensificados são mais prejudiciais. Contudo, a pegada de carbono por quilograma de peso vivo foi de 18,5 kg CO₂eq no sistema degradado, 12,6 kg CO₂eq no sistema ILPF e 9,4 kg CO₂eq no sistema com PM. Estes valores não consideram o potencial de sequestro de carbono do solo no sistema de PM do solo mais o eucalipto nos sistemas integrados do ILPF. Quando o sequestro de carbono é levado em conta, a pegada de carbono diminui para 7,6 kg CO₂eq por quilograma de peso vivo nas pastagens manejadas e chega a -28,1 kg CO₂eq por quilograma de peso vivo nas pastagens integradas no ILPF.

Tabela 3. Pegada de carbono (kg CO₂eq Kg GPV⁻¹ (Ganho de peso vivo) para os sistemas de manejo avaliados: Integração Pecuária-Floresta (IPF), Pastagem Manejada 1 (PM 1), Pastagem Manejada 2 (PM 2) para o período avaliado de 2020 a 2022.

Sistema	Emissões						
	kg CO ₂ eq animal ⁻¹ ano ⁻¹	kg CO ₂ eq ha ⁻¹ ano ⁻¹		kg CO ₂ eq		kg GPV ano ⁻¹	kg CO ₂ eq kg ⁻¹ GPV ano ⁻¹
	Animal (1)	N Fert (2)	Calcário (3)	*Emissão total do rebanho	**Emissão totais por sistema (animal+N+calcário)	***GPV total por área	****Pegada C
IPF	1.617,4	658,0	477,0	787.693,6	1.125.955,17	76.837,7	14,7
PM 1	1.717,4	0,0	0,0	503.210,1	503.210,11	46.228,8	10,9
PM 2	1.717,4	320,0	238,3	333.183,5	521.402,6	30.608,9	17,0
Emissão total da produção pecuária (Fazenda toda)	-	-	-	1.624.087,19	2.150.567,91	153.675,6	10,6

*Emissão total do rebanho = (1) x total de animais do sistema

** Emissão total do sistema = (Emissão total do rebanho + (2) x quantidade de hectare em cada sistema + (3) x quantidade de hectare em cada sistema)

*** GPV total por área = Ganho de peso x total de animais do sistema

****Pegada C = Emissão totais por sistema / GPV total por área

Capacidade de suporte em cada sistema: IPF: 1,63 animas ha⁻¹; PM 1: 0,92 animas ha⁻¹; PM 2: 0,58 animas ha⁻¹;

Tempo de adoção de cada sistema: IPF: 2,25 anos PM 1: 2,25 anos PM 2: 2,25 anos

Quantidade de animais em cada sistema: IPF: 487, PM1:293, PM 2 194

Área em hectares para cada sistema avaliado: IPF: 298,1 ha PM 1: 317,6 ha PM 2: 337,1 ha

4.3. Emissão e Sequestro de C (kg CO₂eq) nos sistemas que contém o componente arbóreo

Ao realizar os cálculos de emissões de GEE e levantar os insumos utilizados na monocultura de eucalipto no período de 2012 a 2022, foi obtido um total de 1.380.012,19 kg de CO₂eq ou 1380,01 tCO₂eq emitidos ao longo de 10 anos. Considerando um possível sequestro de carbono na biomassa do tronco dos eucaliptos de 5,8 t C ha⁻¹ ano⁻¹ (Ronquim, 2007), através do estudo mencionado, a estimativa é que sequestro de carbono nesse sistema ao longo de dez anos seria de 120.102.480,00 kg de CO₂eq, resultando em um crédito de 118.722.467,81 kg de CO₂eq ou 118.722,47 tCO₂eq em 556,03 hectares durante o mesmo período. No contexto do sistema integrado de pecuária e floresta (IPF), registra-se uma emissão anual de 3.777,1 kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹. Em contrapartida, a remoção anual total para todo o sistema é positiva, totalizando 5.673.439 kg CO₂eq ano⁻¹, o que equivale a 5.673,4 tCO₂eq ano⁻¹, considerando uma área de 298,1 hectares. Ao focar especificamente no sistema IPF, é possível alcançar 4.627.584,34 kg CO₂eq ano⁻¹ ou 4.627,58 tCO₂eq ano⁻¹ em créditos de carbono, sendo um resultado com o abatimento das emissões.

Tabela 4. Emissões de Gases de Efeito Estufa e sequestro (kg CO₂eq) do Eucalipto Monocultura e do Sistema Integrado de Pecuária e Floresta (IPF).

Sistema	Quantidade Hectares	Insumos (kg ha ⁻¹)		Emissões (kg CO ₂ eq ha ano ⁻¹)			Sequestro de C (kg CO ₂ eq ano ⁻¹)
		N Fert	Calcário	N ₂ O Fert	Calcário	Emissão (ha)	Remoção eucalipto
EM	556,03	14,6	200	28,58	88	248,2	12.010.248,00
IPF	298,00	3,0	1.000	658,00	477	3.777,1	5.673.439,20

4.4 – Energia elétrica e óleo diesel consumidos para a área total

O consumo de óleo diesel considerado neste estudo para a estimativa das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) corresponde ao total utilizado na fazenda. A média anual de consumo é de aproximadamente 47.808 litros, o que resulta em uma emissão total de 127.772,00 kg de CO₂eq, conforme as notas fiscais apresentadas para esse consumo. Além disso, a energia elétrica consumida anualmente é de 38.550,99 kWh, sendo que a energia de alta voltagem utilizada é destinada ao abastecimento da usina de tratamento de madeira situada na área em análise, resultando em uma emissão de 14,59 kg de CO₂eq.

4.5 – Balanço de carbono estimado para a fazenda em estudo

Ao considerar as emissões de todos os sistemas incluídos no sítio experimental em estudo, obteve-se um valor total de 2.416,36 tCO₂eq ano⁻¹, abrangendo as emissões agropecuárias dos sistemas IPF (1.125,96 tCO₂eq ano⁻¹), PM 1 (503,21 tCO₂eq ano⁻¹), PM 2 (521,40 tCO₂eq ano⁻¹), EM (138,00 tCO₂eq por ano) e as emissões decorrentes da combustão de diesel nas operações agropecuárias (127,77 tCO₂eq por ano) e emissões provenientes do uso da energia elétrica (14,59 kg CO₂eq ano⁻¹). Considerando as remoções de carbono pelos troncos de eucalipto no sistema IPF e na monocultura de eucalipto, obteve-se um total de 17.683,69 tCO₂eq ano⁻¹, resultando em um balanço de carbono negativo de 15.267,33 tCO₂eq ano⁻¹ em uma área de 3.099,67 hectares, conforme podemos notar na figura 5.

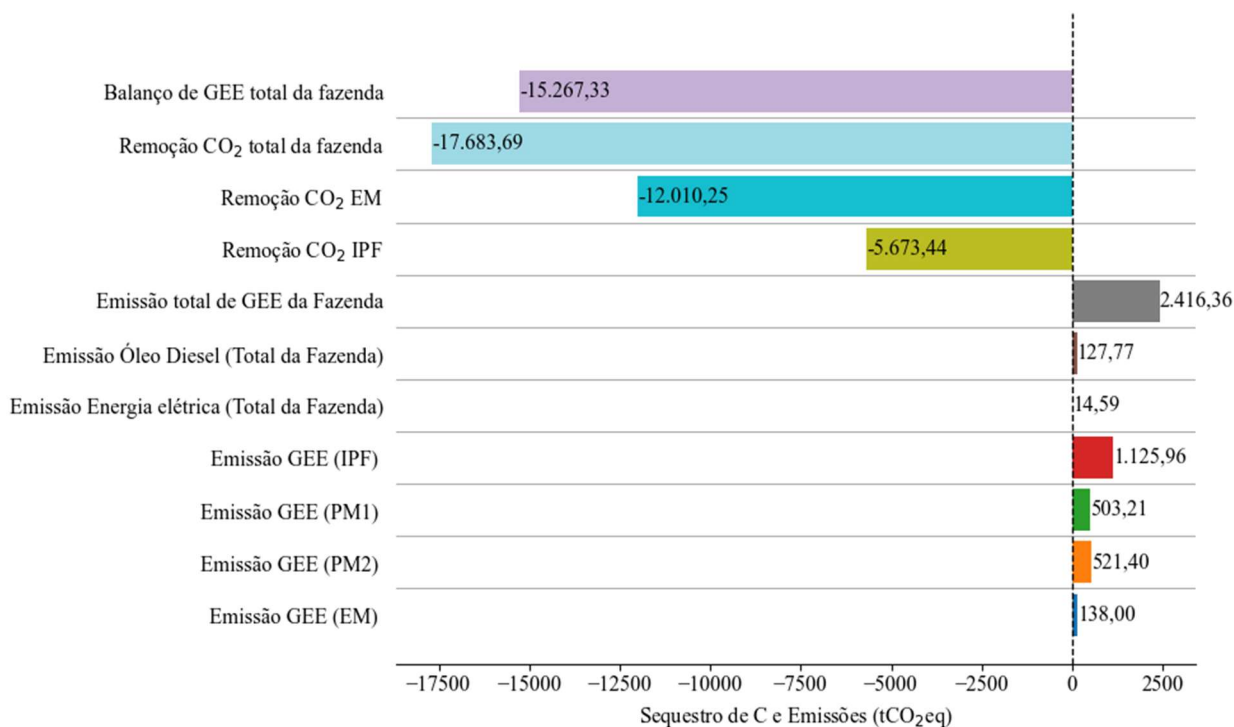


Figura 5. Balanço de GEE da fazenda toda e remoção total de carbono da fazenda, considerando as emissões de GEE para os sistemas de manejo avaliados: Integração Pecuária-Floresta (IPF), Pastagem Manejada 1 (PM 1), Pastagem Manejada 2 (PM 2), Eucalipto

4.6 - Avaliação do estoque de carbono (EC) no solo em função dos diferentes manejos

A Figura 6 apresenta o box-plot com os estoques de carbono (EC) em toneladas por hectare ($t\ ha^{-1}$) no perfil de solo de até 60 cm para todos os sistemas produtivos avaliados: IPF, PM 1, PM 2) e EM. As médias do EC em $t\ ha^{-1}$ não apresentaram diferenças significativas entre os quatro sistemas produtivos avaliados ($p > 0,05$) conforme a tabela 4. Observa-se que o IPF e o EM apresentaram valores para os estoques de carbono no solo de $59,6\ t\ C\ ha^{-1}$ e $57,1\ t\ C\ ha^{-1}$, respectivamente, seguidos por PM com $54,5\ t\ C\ ha^{-1}$ e PM 1 com $54,7\ t\ C\ ha^{-1}$. Embora não tenham sido encontradas diferenças estatísticas significativas, a diferença nos estoques de carbono do solo entre IPF e PM 1 é de $4,9\ t\ C\ ha^{-1}$, após dois anos da implantação do IPF em área com o mesmo tipo de solo (Tabela 1). Isso sugere um acúmulo de carbono no solo sob IPF de $2,45\ t\ C\ ha^{-1}$ por ano, ou $8,98\ t\ ha^{-1}$ de CO_2 absorvido da atmosfera em apenas um ano, totalizando $2.676,0\ t$ de CO_2 absorvido na área total de $298\ ha$ com a implementação do IPF.

No estudo realizado por Carvalho et al. (2010) em fazendas localizadas nos biomas amazônico e cerrado, observou-se que a transição de um sistema agrícola para um sistema integrado resultou em um acúmulo de $2,85\ t\ C\ ha^{-1}$ por ano, com a conversão ocorrendo ao longo de quatro anos, valor superior às nossas estimativas. Em contraste, Salton (2005), em áreas de estudo no Mato Grosso do Sul, identificou um acúmulo de carbono de $0,60\ t\ ha^{-1}$ por ano em áreas com sistema integrado implementado há 9 ou 10 anos, um valor inferior ao encontrado neste estudo. Ribeiro et al. (2023) obteve maiores teores de carbono no solo em áreas integradas de eucalipto com pastagem manejada em comparação com áreas integradas com pastejo extensivo, corroborando os resultados do presente trabalho.

Ao comparar as variações no estoque de carbono do solo entre as áreas de PM 1 e EM, observa-se um acréscimo de $2,4\ t\ C\ ha^{-1}$ para um período de adoção após o plantio de eucalipto de 10 anos, sugerindo um acúmulo de carbono no solo na área de EM de $0,24\ t\ C\ ha^{-1}$ por ano, ou $0,88\ t\ CO_2\ ha^{-1}$ absorvido da atmosfera, totalizando $491,2\ t\ CO_2$ em $559\ ha$ sob EM. Na região do Vale do Rio Doce, em Minas Gerais, a substituição de pastagens degradadas por plantios comerciais de longo prazo de eucalipto (três décadas) resultou em um incremento de $0,5\ t\ C\ ha^{-1}$ por ano na profundidade de 0-20 cm (LIMA et al., 2008), valor inferior ao encontrado neste estudo. Schmidt et al. (2011) destacam a importância de mensurar camadas mais profundas do solo, pois elas contribuem para mais da metade dos estoques globais de carbono no solo.

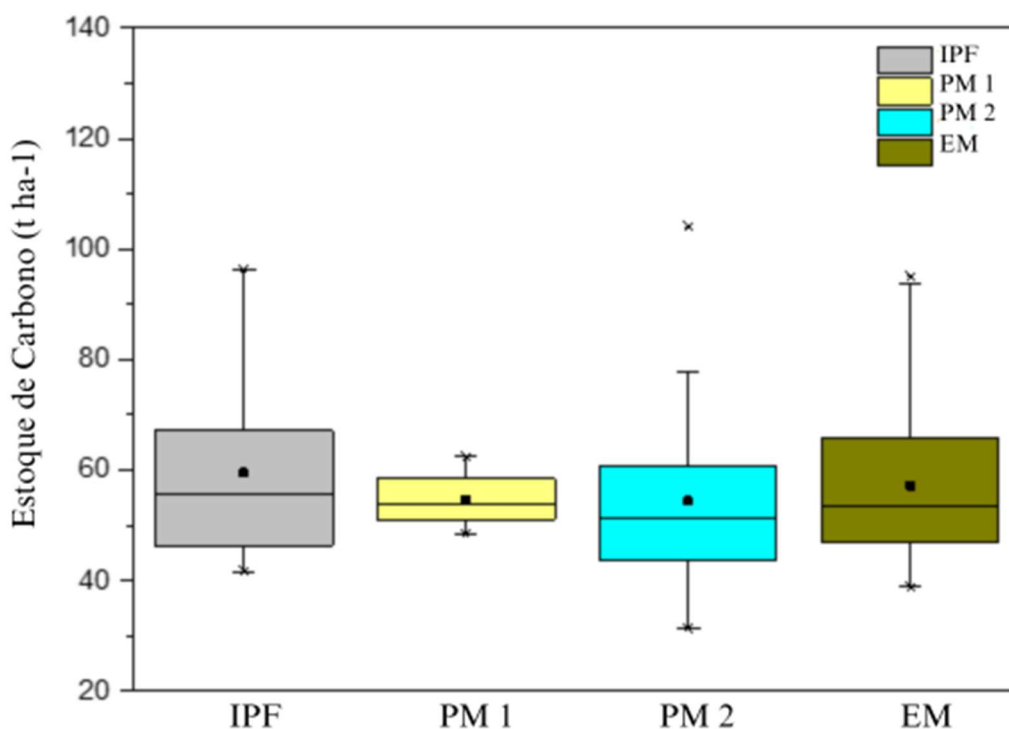


Figura 6. Estoque de carbono do solo (t ha⁻¹) para os diferentes manejos avaliados; Integração Pecuária Floresta (IPF), Pastagem manejada 1 (PM 1), Pastagem manejada 2 (PM 2) e Eucalipto monocultura (EM) para 0-60 cm de profundidade.

O estoque de carbono em PM1 (Figura 6) demonstra pouca variabilidade espacial. Os valores mínimos e máximos são, respectivamente, 48,54 t C ha⁻¹ e 67,48 t C ha⁻¹, próximos da média de 54,01 t C ha⁻¹. No caso da IPF, observam-se maiores variações, com valores mínimos de 41,70 t C ha⁻¹ e máximos de 96,37 t C ha⁻¹, em apenas dois anos após sua implantação, tendo como cenário de base a PM1. Mattos (2016) destaca o sistema silvipastoril como mais equilibrado e sustentável quando comparado a outros sistemas de monocultivos, pois a integração de duas culturas proporciona uma alta entrada de resíduos vegetais.

Ao analisar a PM 2, que tem como cenário de base as áreas de PM1, observa-se que, dois anos após a implantação, os valores variam de 31,40 t C ha⁻¹ (mínimo) a 77,95 t C ha⁻¹ (máximo). Conforme retratado por Bayer et al. (2011), no cerrado, a implantação da pastagem de *Brachiaria* se mostra uma alternativa viável para um maior aporte de carbono no solo, podendo alcançar resultados semelhantes ou, em muitos casos, superiores aos sistemas exclusivamente agrícolas.

4.7 - Avaliação espacial do estoque de carbono do solo em função dos diferentes tipos de manejo

A Figura 7 apresenta a variabilidade espacial do EC do solo para a profundidade de 0-60 cm para a área de estudo abrangendo todos os sistemas produtivos avaliados, IPF, PM 1, PM 2 e EM. É possível observar que a dinâmica dos EC obtidos variam de 31 t ha⁻¹ até 104 t ha⁻¹, para toda a área de estudo, considerando IPF, PM 1, PM 2 e EM, apresentando uma grande variabilidade espacial, mesmo para solos com mesma textura, porém com manejos diferentes (Tabela 1).

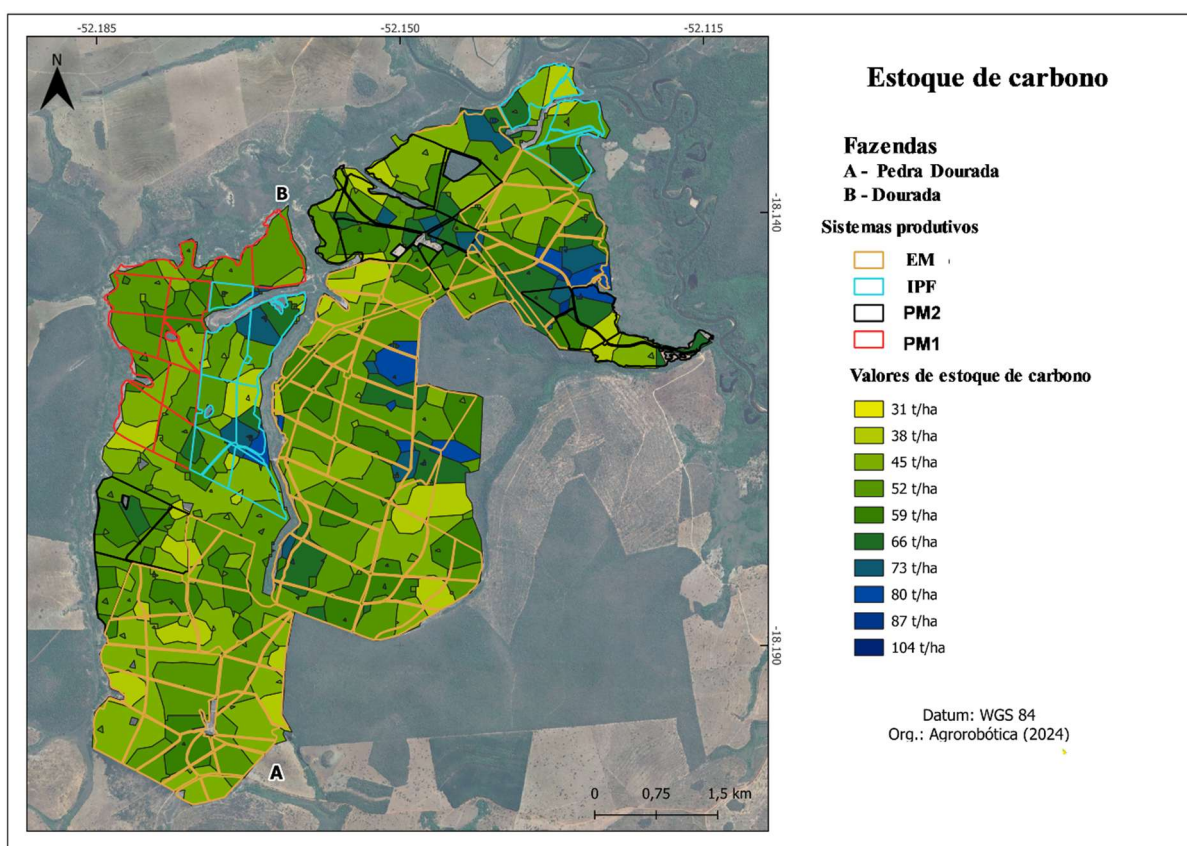


Figura 7. Distribuição espacial do estoque de carbono (EC) (t ha⁻¹) para os diferentes manejos avaliados: Integração Pecuária Floresta (IPF), Pastagem manejada 1 (PM 1), Pastagem manejada 2 (PM 2) e Eucalipto monocultura (EM) para 0-60 cm de profundidade.

4.8 - Avaliação da concentração do carbono quantitativo em função do perfil do solo e dos diferentes tipos de manejo

Os teores de carbono do solo para os diferentes manejos avaliados em função das profundidades são apresentados na Figura 8 (a-d). Para todos os manejos foi constatada uma

redução do teor de carbono no solo com o aumento da profundidade. Maiores valores de carbono no solo nas camadas superficiais também foram apresentados por Salton et al. (2005). O aporte de material em decomposição, como raízes e componentes da biomassa aérea das plantas, constitui fontes de entrada de carbono nas camadas superficiais (Segnini et al., 2019). O acúmulo de matéria orgânica é um fator que pode ser correlacionado como um indicador da qualidade do solo, sendo altamente influenciado pelo manejo adotado (Vezzani, 2001; Mielniczuk et al., 2003). O teor de carbono no solo tem grande importância na avaliação de como as práticas de manejo afetam a qualidade do solo (Favoretto et al., 2008).

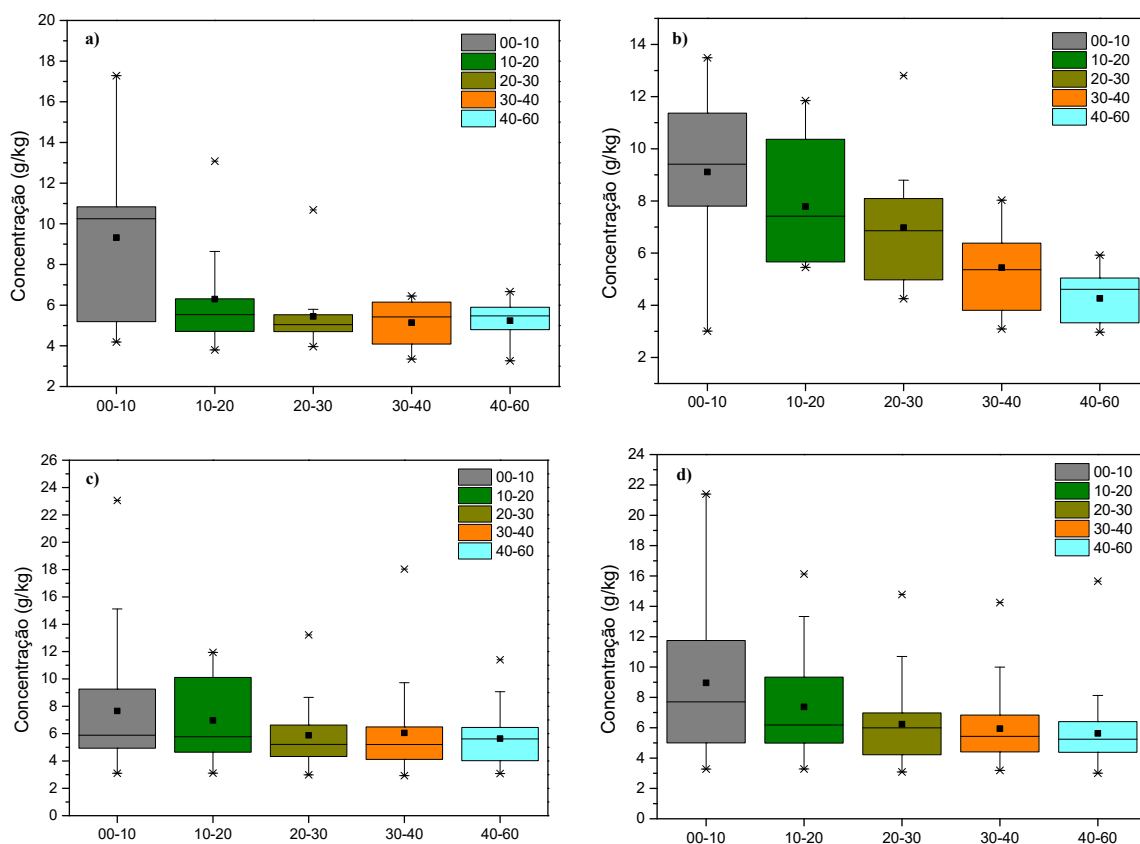


Figura 8. Concentração de carbono do solo (g kg^{-1}) nas camadas de 0-10; 10-20; 20-30; 30-40 e 40-60 cm, para os diferentes manejos avaliados; a) Integração Pecuária Floresta (IPF) b) Pastagem manejada 1 (PM), c) Pastagem manejada 2 (PM) e d) Eucalipto monocultura (EM).

O sistema de produção de bovinos em pastagens IPF apresentou a maior média de teor de carbono no solo nas camadas superficiais (Figura 8a). Isso pode sugerir um maior aporte de material orgânico depositado na superfície do solo ou por raízes, devido ao sistema integrado de pastagem com eucalipto e *Brachiaria*, com a presença da pecuária em ambos os cenários, conforme discutido por Assmann (2013). Nos sistemas IPF e PM, o carbono

orgânico do solo apresenta comportamento divergente quando comparado ao sistema EM de produção em monocultura, com ausência de animais em pastejo. Favoretto et al. (2008) ressaltam que o carbono orgânico do solo é um atributo crucial para compreender como as práticas de manejo afetam a qualidade do solo.

As maiores variações no teor de carbono, foram observadas nos sistemas produtivos IPF e EM nas camadas superficiais (Figuras 8a e 8d), com alguns pontos amostrais apresentando valores de carbono entre $17,29 \text{ g kg}^{-1}$ e $21,40 \text{ g kg}^{-1}$ na profundidade de 0-10 cm. O comportamento do teor de carbono no solo demonstra um decréscimo linear conforme a profundidade aumenta (Figura 8b), corroborado por Shunke (2000), que afirma que 40% a 50% do carbono no solo é armazenado até 30 cm de profundidade e 90% até 60 cm em ecossistemas com pastagens. Portanto, um sistema produtivo como a pastagem, que recobre totalmente o solo, contribui para a recuperação do estoque de carbono (Moraes, 1991).

4.9 - Avaliação da distribuição do carbono qualitativo (H_{FIL}) em função do perfil do solo e dos diferentes tipos de manejo

Mudanças marcantes na MOS são observadas como consequência da alteração no uso do solo, tanto do ponto de vista quantitativo quanto qualitativo (Campbell, 1978; Andreux e Cerri, 1989). Os quatro cenários de estudo, IPF, Pastagem Manejada 1 (PM 1), Pastagem Manejada 2 (PM 2) e Eucalipto Monocultura (EM), apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) conforme a tabela 4. Para o carbono qualitativo, pode-se observar que houve uma diferença significativa ao nível de confiança de 95% entre os índices de humificação do solo, já que em todas as profundidades o F calculado obteve um valor maior que o F crítico, que é de 2,68, confirmado pelo valor de p ($p < 0,05$). A Figura 9(a-d) mostra o box-plot do H_{FIL} nos diferentes manejos avaliados em função das profundidades. Ao contrário do comportamento do carbono quantitativo, o H_{FIL} aumenta com a profundidade em todos os manejos IPF, PM 1, PM 2 e EM, sendo correlacionado à presença de carbono recalcitrante nas camadas mais profundas amostradas. No estudo de Segnini et al. (2011), é destacado que, em profundidades maiores do solo, a estabilidade do carbono tende a ser mais elevada, o que está associado à maior decomposição de substâncias húmicas por microrganismos. Esse processo ocorre devido às condições físico-químicas do solo em camadas mais profundas, que influenciam a dinâmica do carbono e a atividade microbiana, promovendo a transformação e estabilização da matéria orgânica, resultando em carbono recalcitrante em profundidades maiores. O H_{FIL} corresponde à área de fluorescência e ao teor de carbono total; portanto, o H_{FIL} é determinado

pela normalização da área de fluorescência pelo teor de carbono total (Milori et al., 2006; Segnini et al., 2011, 2013).

Observa-se que a Figura 9b apresenta os maiores valores de H_{FIL} na camada de 40–60 cm, indicando a presença de carbono recalcitrante, conforme relatado no estudo de Silva e Mendonça (2007). Segnini et al. (2019) avaliaram pastagens em quatro sistemas de produção de bovinos de corte: pastagem intensiva e irrigada com alta lotação (IHS); pastagem de sequeiro com alta lotação (DHS); pastagem de sequeiro com lotação moderada (DMS); e pastagem degradada (PD). Entre todos os cenários de estudo, a pastagem degradada apresentou o maior H_{FIL} na camada de 40–60 cm, corroborando nossas estimativas.

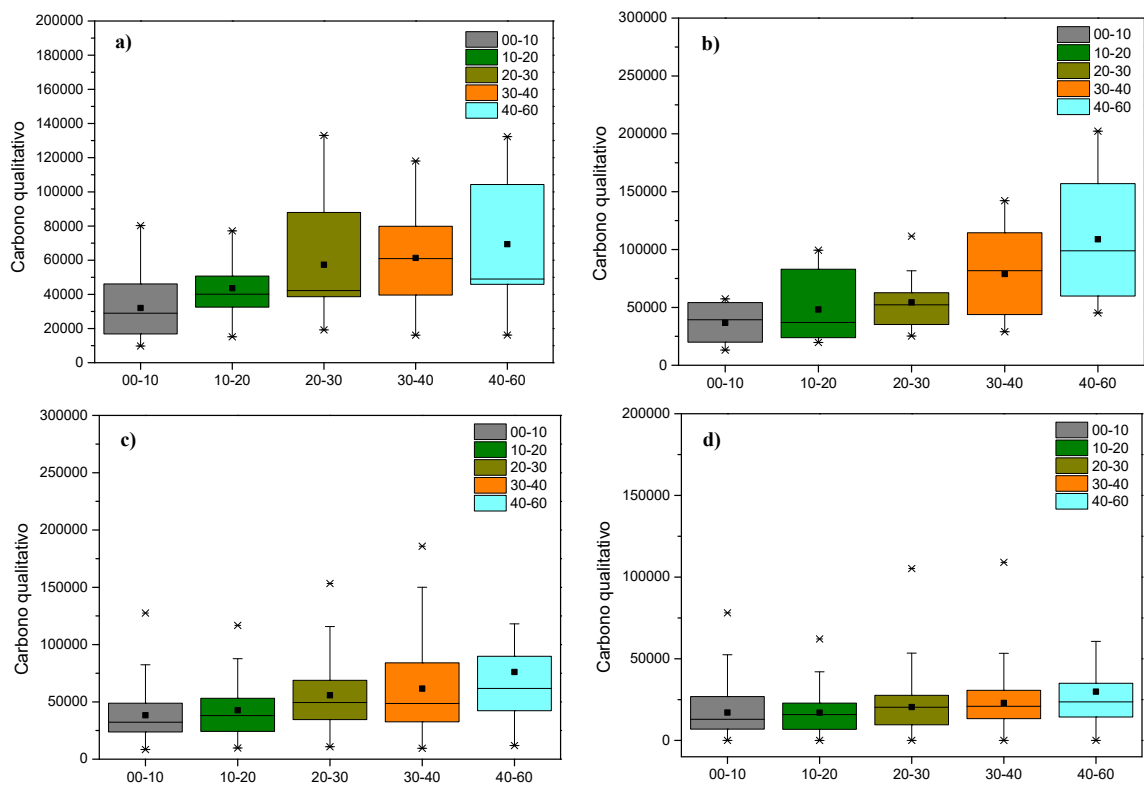


Figura 9. Teor de carbono qualitativo, (H_{FIL}) no perfil do solo em unidade adimensional (00-10; 10-20; 20-30; 30-40 e 40-60 cm) para os diferentes manejos avaliados; a) Integração Pecuária Floresta (IPF) b) Pastagem manejada 1 (PM)), c) Pastagem manejada 2 (PM) e d) Eucalipto monocultura (EM).

O sistema produtivo EM (Figura 9d) apresenta valores de H_{FIL} inferiores aos dos demais sistemas analisados (PM 1, PM 2 e IPF) nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-60 cm. Essa característica é típica de monoculturas, onde o tipo e a quantidade de resíduos vegetais são constantes, resultando em poucas mudanças no H_{FIL} . Além disso, o baixo valor de carbono qualitativo sugere uma maior presença de carbono lábil, que é menos estável. Carneiro (2010) comenta que a espessa camada de serrapilheira fornecida pelo

eucalipto ao solo resulta em um volume de material orgânico superior à capacidade de degradação dos microrganismos, implicando em um menor H_{FIL} .

O sistema produtivo IPF apresenta uma grande variação no H_{FIL} na profundidade de 20-30 cm (Figura 9a). Neste sistema, há uma ampla variedade de carbono presente nessa profundidade, com alguns pontos amostrais mostrando carbono recalcitrante, com alto H_{FIL} (valores máximos representados no box-plot), e outros com carbono lábil, com baixo H_{FIL} . Em um estudo conduzido por Tadini et al. (2019), comparando três sistemas integrados IPF, ILPF e ILP, floresta nativa, todos localizados na área experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, foi observado que o ILP apresentou maiores valores de H_{FIL} na profundidade de 20-30 cm do que o IPF, e o IPF apresentou valores maiores que os dos demais sistemas. No entanto, entre todas as profundidades e sistemas avaliados, o IPF mostrou-se com carbono mais estável e H_{FIL} maior.

5.0 - Avaliação estatística usando análise de variância (ANOVA)

Os resultados da análise de variância para os diferentes manejos estudados, pode ser observada na Tabela 5. Para o estoque de carbono é possível observar que não houve diferença significativa ao nível de 95% de confiança entre os estoques de carbono, pois o $F_{calculado}$ teve valor 0,6033 sendo menor que o $F_{crítico}$ que tem valor 2,68 sendo confirmado pelo p-valor com valor de 0,6141. Para o carbono quantitativo não houve diferença significativa ao nível de 95% de confiança, pois em todas as profundidades o $F_{calculado}$ obteve valor menor que o $F_{crítico}$ que tem valor 2,68 sendo confirmado pelo p-valor $p > 0,05$. Já para o carbono qualitativo pode-se observar que houve diferença significativa ao nível de 95% de confiança entre os índices de humificação do solo, pois em todas as profundidades o $F_{calculado}$ obteve valor maior que o $F_{crítico}$ que tem valor 2,68 sendo confirmado pelo p-valor $p < 0,05$.

Tabela 5. Análise de variância (ANOVA) para o estoque de carbono (EC) quantitativo e qualitativo.

Parâmetro avaliado	Camadas (cm) e/ou EC t ha⁻¹	F_calculado	F_crítico	Valor p
EC	t ha ⁻¹	0,6032	2,68	0,6141
Carbono quantitativo	00-10	0,9747	2,68	0,407
	10-20	0,5934	2,68	0,620
	20-30	0,7002	2,68	0,553
	30-40	0,2507	2,68	0,860
	40-60	1,7791	2,68	0,154
Carbono qualitativo	00-10	7,43	2,68	0,00013
	10-20	12,67	2,68	2,96E-07
	20-30	14,92	2,68	2,56E-08
	30-40	13,95	2,68	7,3E-08
	40-60	11,37	2,68	1,28E-06

6.0 – Conclusões

Entre os sistemas de produção de bovinos de corte avaliados neste estudo, IPF apresentou as maiores emissões totais de GEE, devido à maior taxa de lotação animal adotada neste sistema e ao maior uso de insumos como calcário e fertilizantes nitrogenado, seguido por PM 2 e PM 1 que não utilizaram fertilizantes e calcário.

Sem considerar o potencial sequestro de C no solo e na biomassa do eucalipto, a menor pegada de C para os três sistemas avaliados foi para PM1 com 10,9 kg CO₂eq kg⁻¹ GPV ano⁻¹, sem uso e aplicação de insumos e fertilizantes, seguido por IPF e PM 2 com 14,7 e 17,0 kg CO₂eq kg⁻¹ GPV ano⁻¹ respectivamente, sugerindo que nestes sistemas de produção de bovinos com uso de insumos e corretivos para melhoria das qualidades químicas do solo, pode-se elevar a capacidade de suporte animal e reduzir as emissões relativas de CO₂ da produção animal. Considerando-se as emissões de GEE para a produção de bovinos de corte dos três sistemas avaliados para toda a fazenda, a pegada média de C foi de 10,6 kg CO₂eq kg⁻¹ GPV ano⁻¹.

No que diz a respeito aos estoques de C no solo foram observados para IPF e EM, sugerindo maior potencial de acúmulo de C no solo em áreas com eucaliptos, porém com

grande variabilidade espacial considerando os quatro sistemas avaliados e com mesmo padrão e tipos de solos.

Para os valores de H_{FIL} que determina a qualidade e estabilidade do carbono no solo, todos os sistemas avaliados apresentaram maiores valores em camadas mais profundas do solo, sendo que as áreas de pastagens apresentaram maior estabilidade do C do solo, quando comparadas com eucalipto monocultura.

Uma vez considerando as estimativas de remoções de C-CO₂ apenas da biomassa aérea de eucalipto monocultura (EM, 12.010 t CO₂eq) e da área de IPF (5.673 t CO₂eq) e as emissões totais de GEE da fazenda toda (2.416 t CO₂eq), estas remoções de C-CO₂ podem estar compensando não apenas as emissões de GEE da produção de bovinos de corte da fazenda para o período avaliado, mas as emissões da propriedade toda, apresentando um potencial crédito de C de 15.267 t CO₂eq ano⁻¹, sem considerar o potencial sequestro de C no solo nas áreas de pastagens e de eucalipto, podendo contribuir para a absorção de CO₂ da atmosfera e reduzir os efeitos das Mudanças Climáticas Globais.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Fabiana Villa.** O futuro da agricultura nacional está no plano ABC+ [entrevistado pela Equipe da Redação-Agroanalysis]. *AgroANALYSIS*, v. 42, n. 9, p. 8-10, 2022.
- ANDREUX, F.; CERRI, C. C.** Current trends in the research on soil changes due to deforestation, burning and cultivation in the Brazilian tropics. *Toxicology and Environmental Chemistry*, v. 20, p. 275-283, 1989.
- ANDREUX, F.; CERRI, C. C.; CASSOL, L. C.; GIASSON, M. S.; GIASSON, N. F.** Fixação biológica de nitrogênio por plantas de trevo (*Trifolium spp.*) em sistema de integração lavoura-pecuária no Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 36, n. 5, p. 1435-1442, 2007.
- ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; CORDEIRO, L. A. M.; EVANGELISTA, B. A.** Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. Brasília: Embrapa, 2019.
- ASSMANN, Joice Mari.** Estoque de carbono e nitrogênio no solo e ciclagem de nutrientes em sistema de integração soja-bovinos de corte em plantio direto de longa duração. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná,

Curitiba, 2013.

BAKUCS, Z.; FERTŐ, I.; VÍGH, E. Crop Productivity and Climatic Conditions: Evidence from Hungary. *Agriculture*, v. 10, n. 9, p. 421, 22 set. 2020.

BARROS, Mallú de Mendonça et al. Percepção de produtores de leite diante do plano para uma agricultura de baixa emissão de carbono. 2020. Trabalho apresentado no Congresso Brasileiro de Sistemas de Produção, São Carlos.

BAYER, C. et al. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. In: KLAUBERG FILHO, O. et al. (Ed.). *Tópicos em ciência do solo*, v. 7. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. p. 55-118

BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. de (Ed.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. 788 p. ISBN 978-65-89957-66-9.

BOMBELLI, A. et al. Mudanças climáticas, agricultura sustentável e sistemas alimentares: o mundo depois do acordo de Paris. In: **ALCANÇANDO os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável através de Sistemas Alimentares Sustentáveis**. Cham: Springer, 2019. p. 25-34. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23969-5>.

BORDONAL, R. O. et al. Changes in quantity and quality of soil carbon due to the land-use conversion to sugarcane (*Saccharum officinarum*) plantation in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 240, p. 54-65, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.016>.

BORGHI, Emerson et al. Recuperação de pastagens degradadas. In: **Agricultura de baixo carbono: tecnologias e estratégias de implantação**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. v. 4, p. 105-138.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Fatores nacionais para emissão e remoção de gases de efeito estufa na agropecuária: Coletânea inédita do MAPA. Brasília: MAPA, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/fatores-nacionais-para-emissao-e-remocao-de-gases-de-efeito-estufa-na-agropecuaria-estao-em-coletanea-inedita-do-mapa/Coletanea_agricultura.pdf. Acesso em: 20 jan. 2024.

- CAMPBELL, C. A.** Soil organic carbon, nitrogen and fertility. In: **SCHINITZER, M.; KHAN, S. U. (Ed.).** *Soil Organic Matter*. New York: Elsevier Sc. Pub., 1978. p. 173-271.
- CARDOSO, Abmael da Silva et al.** Avaliação das emissões de gases de efeito estufa em diferentes cenários de intensificação de uso das pastagens no Brasil Central. 2012.
- CARNEIRO, Silvia Pereira.** Qualidade de um Latossolo Vermelho sob diferentes tipos de usos e manejos em área de cerrado. 2010.
- CARVALHO, J. L. N. et al.** Impacto dos Sistemas de Pastagem, Agricultura e Pecuária nos Estoques de Solo C no Brasil. *Cultivo do Solo Res.*, v. 110, n. 1, p. 175-186, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.07.011>.
- CARVALHO, João Luís Nunes et al.** Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 110, n. 1, p. 175-186, 2010.
- CERRI, C. E. P. et al.** Agricultura tropical e aquecimento global: impactos e opções de mitigação. *Scientia Agricola*, v. 64, p. 83-99, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-Climate> change mitigation and agriculture. London: Earthscan, 2011b. v. 2, p. 1-30.
- CLAESSEN, Marie Elisabeth Christine et al.** Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. 212 p.
- COOK, J. et al.** Consenso sobre o consenso: uma síntese das estimativas consensuais sobre o aquecimento global causado pelo homem. *Environmental Research Letters*, v. 11, 048002, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/048002>.
- COSTA, V. C. et al.** Qualitative and Quantitative Analysis of Soils Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy and Chemometrics Tools. *Journal of Applied Spectroscopy*, v. 87, p. 378-386, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10812-020-01010-5>.
- DE FIGUEIREDO, Eduardo Barretto et al.** Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting pasture-management systems in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 420-431, 2017.
- DE SOUSA ALVES, Danielle et al.** A Importância das Medidas de Mitigação e Adaptação Frente às Mudanças Climáticas na Agropecuária Brasileira. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 11, p. 108413-108425, 2021.

- DEL PRADO, A.; MANZANO, P.; PARDO, G.** The role of the European small ruminant dairy sector in stabilising global temperatures: Lessons from GWP* warming-equivalent emission metrics. *Journal of Dairy Research*, v. 88, n. 1, p. 8-15, 2021. DOI: 10.1017/S0022029921000157.
- DEMARCHI, J. J. A. A. et al.** Resultados preliminares sobre emissão de metano por Bovinos Nelore no Brasil pastando *Brachiaria brizantha* cv. Marandú. In: **CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE MITIGAÇÃO DE METANO E ÓXIDO NITROSO**, 2003, Carvão Chinês. Procedimentos. 2003.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA).** Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.
- EUCLIDES, V. P. B. et al.** Cientista brasileiro fi c progresso na pesquisa de pastagens durante o fi primeira década do século XXI. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 39, p. 151-168, 2010.
- EU-NIR.** Annual European Union Greenhouse Gas Inventory 1990-2018 and Inventory Report 2020. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. *European Environmental Agency*. EEA Report/2020, 2020.
- FAO.** The State of Food and Agriculture. Overcoming water challenges in agriculture. Rome, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cb1447en>.
- FAVORETTO, C. M. et al.** Determination of humification degree of organic matter of an Oxisol and of its organic mineral fractions. *Química Nova*, v. 31, p. 1994-1996, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000800015>.
- FERREIRA, C. et al.** Laser-induced breakdown spectroscopy: Extending its application to soil pH measurements. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, v. 110, p. 96-99, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sab.2015.06.002>.
- FERREIRA, Zenaide Rodrigues.** Incorporando os efeitos do clima na medida de progresso técnico: uma análise para a agricultura brasileira. 2024.
- GALBÁCS, Gábor.** A critical review of recent progress in analytical laser-induced breakdown spectroscopy. *Analytical and bioanalytical chemistry*, v. 407, p. 7537-7562, 2015.

- GLUMAC, N. G.; DONG, W. K.; JARRELL, W. M.** Quantitative Analysis of Soil Organic Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: an improved method. *Soil Science Society of America Journal*, v. 74, p. 1922-1928, 2010. DOI: 10.2136/sssaj2010.0100.
- GONTIJO NETO, M. M. et al.** Mitigação de gases de efeito estufa em sistema de Integração Pecuária-Floresta e potencial de produção de Carne Carbono Neutro: Fazenda Lagoa dos Currais, Curvelo-MG. 2018.
- HAYES, Michael HB; SWIFT, Roger S.** Vindication of humic substances as a key component of organic matter in soil and water. **Advances in Agronomy**, v. 163, p. 1-37, 2020.
- Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) em números.** Brasil, 2021. Disponível em: <https://redeilpf.org.br/ilpf-em-numeros/>. Acesso em: 10 de outubro de 2022.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC).** IPCC: Guidelines for National Green House Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. In: EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Eds.). Japão: IGES, 2006. Chapter 5, Cropland.
- IPCC.** Diretrizes do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, preparados pelo Programa Nacional de Inventários de Gases de Efeito Estufa, EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (eds.). 2006. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Acesso em: 02 ago. 2017.
- IPCC.** Mudança climática 2013: a base da ciência física. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [STOCKER, T. F. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e New York, NY, EUA, 2013. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>. Acesso em: 05 set. 2017.
- IPCC.** Resumo para formuladores de políticas do relatório especial do IPCC sobre o aquecimento global de 1,5°C aprovado pelos governos. Cambridge University Press: Cambridge, Reino Unido, 2018.
- IPCC.** Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. In: SMITH, P.; BUSTAMANTE, M. (Eds.). Contribuição do Grupo de Trabalho III para o 5º Relatório de Avaliação do IPCC "Mudanças Climáticas 2014: Mitigação das Mudanças

Climáticas". Aceito, mas não aprovado em detalhes pela 12ª Sessão do Grupo de Trabalho III e pela 39ª Sessão do IPCC em 12 de abril de 2014 em Berlim, Alemanha, 2014.

IPCC. Relatório especial sobre mudanças climáticas, desertificação, degradação da terra, manejo sustentável da terra, segurança alimentar e fluxos de gases de efeito estufa em ecossistemas terrestres. 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/Fullreport-1.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2024.

IPCC. Mudanças climáticas 2021: a base da ciência física. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10>. Acesso em: 27 ago. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Downloads de Geociências. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 22 abril. 2024

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Dados históricos. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 22 abril. 2024

JAT, M. L.; CHAKRABORTY, D.; LADHA, J. K.; PARIHAR, C. M.; DATTA, A.; MANDAL, B.; NAYAK, H. S.; MAITY, P.; RANA, D. S.; CHAUDHARI, S. K. Potencial de sequestro de carbono, desafios e estratégias para a ação climática em sistemas agrícolas de pequenos produtores do sul da Ásia. *Ambiente de colheita*, v. 1, p. 86–101, 2022. DOI: 1080/03736245.2010.480842.

KNADEL, M.; GISLU, R.; HERMANSEN, C.; PENG, Y.; MOLDRUP, P.; JONGE, L. W.; GREVE, M. H. Comparing predictive ability of laser-induced breakdown spectroscopy to visible near-infrared spectroscopy for soil property determination. *Biosystems Engineering*, v. 156, p. 157-172, 2017. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.01.007.

LADHA, J. K.; RAO, A. N.; STÜHRER, M.; MAFONGYA, P. L.; GILL, G.; LEE, K. L. Biological nitrogen fixation and prospects for ecological intensification in cereal-based cropping systems. *Field Crops Research*, v. 283, p. 108541, 2022.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, v. 304, p. 1623-1627, 2004. DOI: 10.1126/science.1097396.

LAL, Rattan. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, v. 7, n. 5, p. 5875-5895, 2015.

LIMA, A. M. N.; SILVA, I. R. da; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F. de; BARROS, N. F.;

- SÁ MENDONÇA, E.; DEMOLINARI, M. S. M.; LEITE, F. P.** Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do Rio Doce, MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 1053-1063, 2008.
- LIMA, W. S.** Medidas no manejo nutricional de bovinos de corte para mitigar emissões de gases do efeito estufa. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Brasil.
- MAGALHÃES, C. A. S. et al.** Índices de conforto térmico em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) no ecótono Cerrado/Amazônia. *Boletim Informativo*. Embrapa Agrossilvipastoril, Sinop, MT, 2018.
- MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; SPINELLI-ARAÚJO, L.; SAMPAIO, F. G.; SOTTA, E. D.; VICENTE, L. E.; PEREIRA, S. E. M.; LOEBMANN, D. G. S. W.; VICENTE, A. K.** As tecnologias do Plano ABC na mitigação de gases de efeito estufa. *Agroanalysis*, v. 39, p. 30-31, 2019.
- MATTOS, G. S.** Estoque de carbono orgânico do solo em sistemas agroflorestais com seringueira no sul do estado da Bahia, Brasil. 2016. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ.
- MILORI, D. M. P. B.; SEGNINI, A.; SILVA, W. T. L.; POSADAS, A.; MARES, V.; QUIROZ, R.; MARTIN-NETO, L.** Emerging techniques for soil carbon measurements. In: WOLLENBERG, E.; NIHART, A.; TAPIO-BISTRÖM, M.-L.; GRIEG-GRAN, M. (Ed.). *Climate change mitigation and agriculture*. London: Earthscan, 2011b. v. 2, p. 1-30.
- MILORI, D.; GALETI, H. V. A.; MARTIN-NETO, L.; DIECKOW, J.; GONZALEZ-PEREZ, M.; BAYER, C.; SALTON, J.** Organic matter study of whole soil samples using laser-induced fluorescence spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, v. 70, n. 1, p. 57-63, 2006.
- MINASNY, B. et al.** Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, v. 292, p. 59-86, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>. Acesso em: 27 ago. 2024.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO.** Plano ABC+. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais>. Acesso em: 15 abr. 2024.
- MORAES, J. F. L.** Conteúdos de Carbono e Tipologia de Horizontes nos Solos da Bacia Amazônica. 1991. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear de Agricultura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

- NOAA.** Laboratório de Pesquisa do Sistema Terrestre. 2020. Disponível em: www.esrl.noaa.gov. Acesso em: 15 dez. 2020.
- OBSERVATÓRIO DA TERRA DA NASA.** Goddard Space Flight Center, Estados Unidos. Disponível em: www.earthobservatory.nasa.gov. Acesso em: 15 maio 2024.
- OBSERVATÓRIO DO CLIMA.** Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG). Relatório de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Ano 2023. Disponível em: <https://seeg.eco.br>. Acesso em: 20 abr. 2024.
- OLK, D. C. et al.** Environmental and agricultural relevance of humic fractions extracted by alkali from soils and natural waters. *Journal of environmental quality*, v. 48, n. 2, p. 217-232, 2019.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO.** Agricultura inteligente para o clima: criando resiliência às mudanças climáticas. Berlim/Heidelberg: Springer, 2018.
- PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS.** Resumo para formuladores de políticas. Em: *Mudança Climática 2014: Relatório Síntese; Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III ao Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas*. Stocker, T. F. et al. (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- PEZZOPANE, J. R. M. et al.** Biomassa e estoque de carbono em árvores de eucalipto em sistemas integrados de produção pecuária. In: BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Fatores nacionais para emissão e remoção de gases de efeito estufa na agropecuária: Coletânea inédita do MAPA*. Brasília: MAPA, 2023. p. 126. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/fatores-nacionais-para-emissao-e-remocao-de-gases-de-efeito-estufa-na-agropecuaria-estao-em-coletanea-inedita-do-mapa/Coletanea_agricultura.pdf. Acesso em: 20 maio 2024.
- PICCOLO, Alessandro.** The supramolecular structure of humic substances. *Soil science*, v. 166, n. 11, p. 810-832, 2001.
- REIS, J. C.; KAMOI, M. Y. T.; LATORRACA, D.; CHEN, R. F. F.; MICHETTI, M.; WRUCK, F. J.; et al.** Avaliação da viabilidade econômica de sistemas integrados lavoura-pecuária em Mato Grosso, Brasil. *Renovar. Agrícola. Sistema Alimentar*, v. 35, n. 6, p. 631-642, 2019. doi:10.1017/s1742170519000280.

- RIBEIRO, Diego Oliveira et al.** Carbon stocks and lability in land use and management systems in southwestern Goiás, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 53, p. e74416, 2023.
- RICHTER, Marc François; DE LARA, Daniela Mueller; ANDREAZZA, Ricardo de Carly Luz.** Educação Ambiental e Gases do Efeito Estufa (GEE): uma abordagem do papel do metano para Educação Básica. *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, v. 16, n. 5, p. 431-445, 2021.
- RONQUIM, C. C.** Dinâmica espaço temporal do carbono aprisionado na fitomassa dos agroecossistemas do Nordeste do Estado de São Paulo. *Documentos*, v. 63, 2007.
- SALTON, J. C.** Matéria orgânica e agregação do solo na rotação de trabalho-pastagem em ambiente tropical. Tese de Doutorado. Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2005. 158 p.
- SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M.** Sistema de integração lavoura-pecuária no Brasil tropical: em direção a um sistema de produção sustentável. *Agric. Ecosyst. Environ.*, v. 190, p. 70-79, 2014.
- SCHMIDT, M. W. I.; RASGADO, M. S.; EM; ABIVEN, S.; DITTMAR, T.; GUGGENBERGER, G.; JANSSENS, I. A.; KLÉBER, M.; KOGEL-KNÜNER, I.; LEHMANN, J.; MANNING, D. A. C.; NANNIPIERO, P.; RASSE, D. P.; WEINER, S.; TRUMBORE, S. E.** Persistência da matéria orgânica do solo como propriedade do ecossistema. *Natureza*, v. 478, p. 49-56, 2011.
- SEGNINI, A. et al.** Soil carbon stocks and stability across an altitudinal gradient in southern Peru. *Journal of soil and water conservation*, v. 66, n. 4, p. 213-220, 2011.
- SEGNINI, A.; PEREIRA, A. A.; OTAVIANI, P. L.; FERREIRA, E. C.; WANATABE, A. M.; SPERANÇA, M. A.; NICOLODELLI, G.; VILLAS-BOAS, P. R.; OLIVEIRA, P. P. A.; MILORI, D. M. B. P.** Physical and Chemical Matrix Effects in Soil Carbon Quantification Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *American Journal of Analytical Chemistry*, v. 5, p. 722-729, 2014. DOI: 10.4236/ajac.2014.511080.
- SEGNINI, A.; POSADAS, A.; LOPES DA SILVA, W. T.; MILORI, D. M. B. P.; GAVILAN, C.; CLAESSENS, L.; QUIROZ, R.** Quantifying soil carbon stocks and humification through spectroscopic methods: A scoping assessment in EMBU-Kenya. *Journal of Environmental Management*, v. 234, p. 476-483, 2019. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.108>. Acesso em: 29 de setembro de 2024.

- SENESI, N.; SENESI, G. S.** Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) to measure quantitatively soil carbon with emphasis on soil organic carbon. A review. *Analytica Chimica Acta*, v. 938, p. 7-17, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.07.039>.
- SHUNKE, R. M.** Alternativas de manejo de pastagem para melhor aproveitamento do nitrogênio do solo. In: WORKSHOP NITROGÊNIO NA SUSTENTABILIDADE DE SISTEMAS INTENSIVOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA, 2000, Dourados. *Anais...* Dourados: Embrapa Agropecuaria Oeste; Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2000. p. 125-140. (Embrapa Agropecuária Oeste. Documentos, 26; Embrapa Agrobiologia. Documentos, 128).
- SILVA, Arystides Resende et al.** Estoque de carbono e mitigação de metano produzido por bovinos em sistema integração pecuária-floresta (IPF) com eucalipto no Sudeste Paraense. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 4, p. 39997-40016, 2021.
- SILVA, I. V.; MEDONÇA, E. SÁ.** Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. *Fertilidade do solo*. 1. ed. Viçosa: SBCS, 2007. p. 275-374.
- SILVA, Rita et al.** Práticas para a mitigação do impacto da agropecuária nas alterações climáticas. *Revista Portuguesa de Zootecnia*, v. 7, n. 1, p. 1-17, 2022.
- SISTI, C. P. J.; DOS SANTOS, H. P.; KOHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.** Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.
- SMITH, Pete et al.** Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). In: CLIMATE CHANGE 2014: MITIGATION OF CLIMATE CHANGE. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p. 811-922.
- TADINI, A. M. et al.** Avaliação da qualidade da matéria orgânica dos solos extraídos de três variações de sistemas integrados no estado de São Paulo, 2019.
- TADINI, A. M.; BERNARDI, A. C. C.; MILORI, D. M. B. P.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; MARTIN-NETO, L.** Spectroscopic characteristics of humic acids extracted from soils under different integrated agricultural production systems in tropical regions. *Geoderma Regional*, v. 28, p. e00476, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00476>. Acesso em: 29 de setembro de 2024.

- UNFCCC. Relatório Anual de Mudanças Climáticas das Nações Unidas 2017. Nações Unidas Convenção-Quadro sobre Mudança do Clima, 2018. ISBN 978-92-9219-175-7. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/annualreport/media/UN-Climate-AR17.pdf>.
- VILLAS-BOAS, P. R.; FRANCO, M. A.; MARTIN-NETO, L.; GOLLANY, H. T.; MILORI, D. M. B. P.** Applications of laser-induced breakdown spectroscopy for soil analysis, part I: Review of fundamentals and chemical and physical properties. *European Journal of Soil Science*, v. 71, p. 789-804, 2020. <https://doi.org/10.1111/ejss.12888>.
- VILLAS-BOAS, P. R.; ROMANO, R. A.; AURÉLIO, M.; FRANCO, M.; FERREIRA, E. C.; FERREIRA, E. J.; CRESTANA, S.; MILORI, D. M. B. P.** Laser-induced breakdown spectroscopy to determine soil texture: A fast analytical technique. *Geoderma*, v. 263, p. 195-202, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.018>.

APÊNDICE

Emissão de CO₂ de calcário

As emissões da aplicação do calcário foram calculadas a partir da equação 1:

Equação 1

$$CO_{2,C} = \left(CO_2 - C \text{ emissões} \times \frac{44}{12} \right) / A_i$$
$$= \left((M_{\text{Calcítico}} \cdot EF_{\text{Calcítico}}) + (M_{\text{Dolomítico}} \cdot EF_{\text{Dolomítico}}) \right) * \frac{44}{12} / A_i$$

Onde:

CO₂-C Emissões → emissões anuais de C provenientes da aplicação de calcário, toneladas C ano⁻¹.

M_{calcítico,j} → Quantidade anual de calcário calcítico (CaCO₃) ou dolomítico (CaMg(CO₃)₂), toneladas por ano.

EF_{CO₂,j} → fator de emissão, tonelada de C (tonelada de calcítico ou dolomítico)⁻¹.

A_i → Área da unidade amostral

J → Calcário calcítico ou dolomítico

Fator de Emissão (tC t ⁻¹)- EF _{CO₂,j}	
Calagem	EF _{CO₂,j}
Calcítico	0.12
Dolomítico	0.13

Aplicação do fertilizante nitrogenado

As emissões diretas da aplicação do fertilizante nitrogenado foram calculadas a partir da equação 2:

Seguindo o Refinamento de 2019 das Diretrizes do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa de 2006, a quantificação deve ser diferenciada por tipo de gado, sistema de manejo de esterco e sistema de produtividade. Foram estimados aplicando-se a Equação (2):

Equação 2

$$N_2O_{Solo_bsl,i,t} = N_2O_{fert_bsl,i,t} + N_2O_{md_bsl,i,t} + N_2O_{fix_bsl,i,t}$$

$N_2O_{Solo_bsl,I,t}$ → Emissões de óxido nitroso devido a entrada de nitrogênio (tCO₂eq ha⁻¹)

$N_2O_{fert_bsl,I,t}$ → emissões de óxido nitroso devido ao uso do fertilizante usado t (tCO₂eq ha⁻¹)

$N_2O_{md_bsl,I,t}$ → Emissões de óxido nitroso devido à deposição de estrume para a unidade de amostra i no ano t (tCO₂eq ha⁻¹)

$N_2ON_{fix_bsl,I,t}$ → Emissões de óxido nitroso de resíduos vegetais devido ao uso de espécies fixadoras de N para a unidade de amostra i no ano t (tCO₂eq ha⁻¹)

As emissões diretas de N₂O dos solos manejados são estimadas separadamente das emissões indiretas, embora usando um conjunto comum de dados de atividade.

Equação 3

$$N_2O_{fert_bsl,i,t} = N_2O_{fert_bsl,direta,i,t} + N_2O_{fert_bsl,indireta,i,t}$$

Onde:

$N_2O_{fert_bsl,direta, I,t}$ → Emissões diretas de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes no ano t (t CO₂eq ha⁻¹)

$N_2O_{fert_bsl,indireta, I,t}$ → Emissões indiretas devido ao uso de fertilizante (t CO₂eq ha⁻¹)

As emissões diretas de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes no cenário de base são quantificadas nas equações a seguir:

Equação 4 e 5

$$\overline{N_2O_{fert_{bsl,direta,i,t}}} = \frac{[(F_{SN,bsl,i,t} + F_{ON,bsl,i,t}) \times EF_{Ndireta} \times 44/28 \times GWP_{N_2O}]}{A_i}$$

$$F_{SN,bsl,i,t} = \sum_{SF} M_{bsl,SF,i,t} \times NC_{SF}$$

$$F_{ON,bsl,i,t} = \sum_{OF} M_{bsl,OF,i,t} \times NC_{OF}$$

Onde:

$\overline{N_2O_{fert_{bsl,direta,i,t}}}$ → Areal média das emissões diretas de nitro devido ao uso de fertilizantes para a unidade de amostra i no ano t (t CO₂eq ha⁻¹)

FSN,bsl,I,t → Fertilizante nitrogenado sintético aplicado à unidade de amostra I no ano t (t N)

FON,bsl,I,t → Adubação nitrogenada orgânica aplicada à unidade amostral I no ano t (t N)

EFNdireta → Fator de emissão para emissões de óxido nitroso a partir de adições de N de fertilizantes sintéticos, corretivos orgânicos e resíduos vegetais (t N₂O – N/t N aplicado).

Mbsl, SF,I,t → Massa de fertilizante sintético contendo N tipo SF aplicada à unidade de amostra I no ano t (adubo t)

NCSF → Teor de N de fertilizantes sintéticos tipo SF (t N/t fertilizante)

Mbsl, OF,I,t → Massa de fertilizante orgânico contendo N tipo OF aplicada à unidade de amostra I no ano (adubo t)

NCOF → Teor de N do tipo de fertilizante sintético OF (t N/t fertilizante)

SF → Fertilizante nitrogenado sintético tipo

OF → Tipo de fertilizante nitrogenado orgânico

44/28 → Razão de massa molar de N₂O para N para converter as emissões de N₂O – N em emissões de N₂O.

A_i → Unidade amostral

Quando as emissões de óxido nitroso devidas à utilização de espécies fixadoras de N são quantificadas no cenário de base utilizando as seguintes equações:

Equação 6

$$\overline{N_2O_{Nfix_{bsl,i,t}}} = \frac{(F_{CR,bsl,i,t} \times EF_{Ndireta} \times \frac{44}{28} \times GWP_{N_2O})}{A_i}$$

Onde:

$\overline{N_2O_{Nfix_{bsl,i,t}}}$ → Areal média das emissões indiretas de óxido nitroso de resíduos vegetais devido ao uso de espécies fixadoras de N a unidade de amostra I no ano t (t CO₂eq ha⁻¹)

$F_{CR,bsl,I,t}$ → Quantidade de N nas espécies fixadoras de N (acima e abaixo do solo) retornada aos solos para a unidade de amostra I no ano t (tN).

$EF_{Ndireta}$ → Fator de emissão para emissões de óxido nitroso a partir de adições de N de fertilizantes sintéticos, corretivos orgânicos e resíduos vegetais (t N₂O – N/t N aplicado).

A_i → Unidade amostral

Equação 7

$$F_{CR,bsl,i,t} = \sum_{g=1}^G MB_{g,bsl,i,t} \times N_{porcentagem,g}$$

$MB_{g,bsl,I,t}$ → Matéria seca anual (acima e abaixo do solo) das espécies fixadoras de N g devolvidas aos solos para a unidade de amostra I no ano (t dm)

$N_{porcentagem,g}$ Fração de N na matéria seca para as espécies fixadoras de N g (t N/t dm).

Emissão indiretas do N₂O

As emissões indiretas de nitro decorrentes do uso de fertilizantes no cenário de base são quantificadas pelas seguintes equações:

Equação 8

$$\overline{N_2O_{fert_{bsl,indireta,i,t}}} = \frac{(N_2O_{fert,bsl,volatização,i,t} - N_2O_{fert_{bsl,lixiviação,i,t}})}{A_i}$$

Equação 9

$$\begin{aligned} N_2O_{fert,bsl,volatilização,i,t} &= [(F_{SN,bsl,i,t} \times Frac_{GASF,l,S}) + (F_{ON,bsl,i,t} \times Frac_{GASM,l,S})] \times EF_{Nvolat} \\ &\times 44/28 \times GWP_{N_2O} \end{aligned}$$

Equação 10

$$\begin{aligned} N_2O_{fert,bsl,lixiviação,i,t} &= (F_{SN,bsl,i,t} + F_{ON,bsl,i,t}) \times Frac_{lixiviação,l,S} \times EF_{Nlixiviação} \times 44/28 \\ &\times GWP_{N_2O} \end{aligned}$$

Onde :

$\overline{N_2O_{fert,bsl,indireta,i,t}}$ → Área média das emissões indiretas de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes para a unidade de amostra I no ano t (t CO₂eq ha⁻¹)

$N_2O_{fert,bsl,volat,i,t}$ → Emissões indiretas de óxido nitroso produzidas a partir da deposição atmosférica de N volatilizado pelo uso de fertilizantes na unidade amostral I no ano t (t CO₂eq)

$N_2O_{fert,bsl,volat,i,t}$ → Emissões indiretas de óxido nitroso produzidas a partir da lixiviação e do escoamento superficial de N, nas regiões onde ocorre a lixiviação e o escoamento superficial, devido ao uso de fertilizantes na unidade amostral I no ano t (t CO₂eq)

$Frac_{GASF,I,t}$ → Fração de todo o N sintético adicionado aos solos que volatiliza como NH₃ e NO_x para o sistema de manejo de esterco S e pecuária tipo I (adimensional).

$Frac_{GASM,I,t}$ → Fração de todo o N orgânico adicionado aos solos e N em esterco e urina depositados nos solos que volatiliza como NH₃ e NO_x para o sistema de manejo de esterco S e pecuária tipo I (adimensional).

EF_{Nvolat} → Fator de emissão de óxido nitroso por deposição atmosférica de N em solos e superfícies de água (t N₂O – N/(t NH₃ – N + NO_x – N volatilizado).

$Frac_{GASM,I,t}$ → Fração de todo o N orgânico adicionado aos solos e N em esterco e urina depositados nos solos que volatiliza como NH₃ e NO_x para o sistema de manejo de

esterco S e pecuária tipo 1 (adimensional).

FracLixiviação,I,t → Fração de N (sintético ou orgânico) adicionado aos solos e em esterco e urina depositados nos solos que é perdido por lixiviação e escoamento, em regiões onde ocorre lixiviação e escoamento, para sistema de manejo de esterco S e pecuária tipo 1 (adimensional)

EFNLixiviação → Fator de emissão para emissões de óxido nitroso por lixiviação e escoamento superficial (t N₂O – N/t N lixiviado e escoamento)

Tiers 1 e 2

Esta seção descreve métodos genéricos para estimar a quantidade de várias entradas de N para solos (FSN, FON, FPRP, FCR,) necessárias para as metodologias de Nível 1 e Nível 2 (Equações 11.1 e 11.2).

O termo FSN refere-se à quantidade anual de fertilizante nitrogenado sintético aplicado aos solos. É estimado a partir da quantidade total de fertilizante sintético consumido anualmente pela unidade de quantificação. Os dados anuais de consumo de fertilizantes serão coletados dos agricultores. Orgânico aplicado ou N fertilizante (FON)

"Adubo nitrogenado orgânico" (FON) refere-se à quantidade de aporte de N orgânico aplicado em solos que não sejam animais em pastejo, e é calculado usando a equação 11 Isso inclui esterco animal aplicado, lodo de esgoto aplicado ao solo, composto aplicado aos solos, bem como outras alterações orgânicas de importância regional para a agricultura (por exemplo, resíduos de transformação, guano, resíduos de cervejaria, etc.). A adubação nitrogenada orgânica (FON) é calculada usando a equação 11:

Equação 11

N do Nitrogênio orgânico aplicado no solo (Tier 1)

$$F_{ON} = F_{AM} + F_{COMP} + F_{OOA}$$

Onde:

FON → total anual de fertilizantes nitrogenados orgânicos aplicados em solos que não sejam animais em pastejo, kg Nyr⁻¹

FAM → quantidade anual de esterco animal de N aplicado aos solos, kg N ano⁻¹.

FCOMP → quantidade anual de N total de composto aplicado nos solos (garantir que o N do estrume no composto não seja duplamente contado), kg N ano⁻¹.

FOOA → quantidade anual de outros aditivos orgânicos utilizados como fertilizantes.

Urina e esterco de animais pastando (FPRP)

O termo FPRP é estimado utilizando a Equação 12 a partir do número de animais em cada espécie/categoria animal T ($N(T)$), da quantidade média anual de N excretado por cada espécie/categoria T ($Nex(T)$) e da fração deste N depositado nas pastagens, pastagens e solos de piquete por cada espécie/categoria T ($MS(T, PRP)$). A equação 12 fornece uma estimativa da quantidade de N de dejetos e N da urina e N esterco depositado no pasto, pastagem, piquete pelos animais a pasto.

Equação 12

(TIER 1)

$$F_{PRP} = \sum_T [(N_{(T)} \cdot Nex_{(T)}) \cdot MS_{(T,PRP)}]$$

Onde:

FPRP → quantidade anual de urina e N esterco depositado no pasto, pastagem, piquete pelos animais a pasto, kg N ano⁻¹.

$N(T)$ → Número de cabeças de animais/categoria T no país.

$Nex(T)$ → excreção média anual de N por cabeça de espécie/categoria T no país, kg N animal⁻¹ ano⁻¹.

$MS(T,PRP)$ → fração da excreção anual total de N para cada espécie animal/categoria T depositada no pasto, na área de distribuição e no piquete.

Resíduos de culturas N, incluindo culturas fixadoras de N e renovação de forragens/pastagens, devolvidos no solo (FCR)

O termo FCR refere-se à quantidade de N presente nos resíduos das culturas (acima e abaixo do solo), incluindo as culturas fixadoras de N, retornadas aos solos anualmente.

Emissões da Pecuária e Gestão de Estrume

A produção pecuária é uma importante fonte de emissão de GEE devido à sua grande população e pode resultar:

- 1) Emissões de metano (CH₄) provenientes da fermentação entérica e
- 2) emissões de CH₄ e de óxido nitroso (N₂O) provenientes dos sistemas de gestão de dejetos pecuários.

Conforme declarado no Refinamento das Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa de 2019, é uma boa prática identificar o método apropriado para estimar as emissões para cada categoria de fonte e, em seguida, basear a caracterização nos requisitos mais detalhados identificados para cada espécie pecuária.

Escolha de Métodos

Na sequência do refinamento de 2019 às Diretrizes do IPCC de 2006 para inventários nacionais de gases com efeito de estufa – as quantificações devem ser diferenciadas por tipo de gado, gestão de estrume e sistema de produtividade. A caracterização básica para o Nível 1 será provavelmente suficiente para a maioria das espécies animais na maioria dos países. O nível 2 exigia informações mais detalhadas. Ambos os métodos serão detalhados abaixo.

Neste Procedimento Operacional Padrão, o foco será em Bovinos e Vacas Leiteiras, uma vez que todos os projetos compreendem apenas esta população pecuária.

NÍVEL 1: CARACTERIZAÇÃO BÁSICA PARA POPULAÇÕES PECUÁRIAS

Para esta abordagem é uma boa prática recolher os seguintes dados de caracterização do gado para apoiar as estimativas de emissões:

Espécies e categorias de gado:

Deve ser desenvolvida uma lista completa de todas as populações pecuárias relevantes que possuem valores de fator de emissão padrão (por exemplo, vacas leiteiras, outros bovinos).

População anual: Os nascimentos ou abates sazonais podem fazer com que o tamanho da população se expanda ou contraia em diferentes épocas do ano, o que exigirá que os números da população sejam ajustados em conformidade.

Consideração sobre diferentes sistemas de produtividade (Nível 1a)

Os fatores de emissão Tier 1 foram desenvolvidos para uso com estimativas básicas da população separadas por sistemas de baixa e alta produtividade de acordo com características

como: base de alimentação, genética, finalidade (projeto, razões culturais, autoconsumo, mercado) , objetivos de produção (por exemplo, leite, carne, ovos) e nível de insumos e produtos.

Para estimar a emissão total, os fatores de emissão selecionados são multiplicados pela população animal associada (Equação 13) e somados (Equação 14):

Equação 13

Emissões de fermentação entérica de uma categoria de gado (Nível 1)

$$E_T = \sum_{(P)} EF_{(T,P)} \cdot \left(\frac{N_{(T,P)}}{10^6} \right)$$

Onde:

E_T → emissões de metano da fermentação entérica na categoria animal t, Gg CH₄ ano⁻¹

$EF_{(T,P)}$ → fator de emissão para a define a população pecuária T e o sistema de produtividade P, em kg CH₄ cabeça⁻¹ ano⁻¹

$N_{(T,P)}$ → o número de cabeças de espécies pecuárias/categoria T no país classificado como sistema de produtividade P

T → espécie/categoria de gado

P → p sistema de produtividade, alta ou baixa produtividade para uso antecipado.

Nível 1a – omitido se estiver usando a abordagem do Nível 1.

Equação 14

Emissões totais de uma fermentação entérica pecuária (Nível 1)

$$Total CH_4_{Entérico} = \sum_{i,P} E_{i,P}$$

Onde:

Total CH₄ Entérico → Emissões totais de metano da fermentação entérica, Gg CH₄ ano⁻¹

E_{i,P} → são as emissões para as i-ésimas categorias e subcategorias pecuárias baseadas em sistemas de produção (P).

O método do Nível 1 implica multiplicar o número total da população pecuária e o fator de emissão de CH₄ para cada categoria de gado. O método do Nível 1a baseia-se no número da população pecuária em cada sistema de produtividade (isto é, sistemas de baixa produtividade e sistemas de alta produtividade) e no fator de emissão de CH₄ para cada categoria de gado desenvolvido por cabeça de animal mantido no sistema de produtividade especificado (Tabela 10.11).

Abordagem de Nível 2 para emissões de metano provenientes da fermentação entérica

O método Tier 2 é aplicado a categorias de população pecuária mais desagregadas e utilizado para calcular factores de emissão, em oposição aos valores padrão. As principais considerações para o método Tier 2 são o desenvolvimento de factores de emissão e a recolha de dados detalhados da atividade.

Usando a abordagem de balanço energético Tier 2, um fator de emissão para cada categoria animal deve ser desenvolvido seguindo a Equação 15:

Equação 15

Fatores de emissão de metano para fermentação entérica da categoria pecuária

$$EF = \frac{GE \cdot \left(\frac{Y_m}{100}\right) \cdot 365}{55.65}$$

Onde:

EF → fator de emissão, kg CH₄cabeça⁻¹ ano⁻¹.

GE → ingestão bruta de energia, MJ cabeça⁻¹ dia⁻¹.

Y_m → fator de conversão de metano, por cento da energia bruta convertida em

metano.

O fator 55,65 (MJ kg⁻¹ CH₄) é o conteúdo energético do metano.

No caso do Tier 2 simplificado, os fatores de emissão deverão ser calculados seguindo a equação 16:

Equação 16

Fatores de emissão de metano para fermentação entérica da categoria pecuária

$$EF = DMI \cdot \left(\frac{MY}{1000} \right) \cdot 365$$

Onde:

EF → fator de emissão, kg CH₄ cabeça⁻¹ ano⁻¹.

DMI → kg DMI dia⁻¹.

MY → rendimento de metano, g CH₄ kg DMI⁻¹.

365 → dias por ano.

1000 → conversão de g CH₄ em kg CH₄.

Equação 17

Emissões de CH₄ provenientes da gestão de estrume (Nível 1)

$$CH_4 = \left[\sum_{T,S,P} (N_{(T,P)} \cdot VS_{(T,P)} \cdot AWMS_{(T,S,P)} \cdot EF_{T,S,P}) / 1000 \right]$$

Onde:

CH₄(mm) → Emissões de CH₄ provenientes da Gestão de Estrume no país, kg CH₄+ano⁻¹

N(T,P) → número de cabeças de espécie/categoria T existentes no país, para o sistema de produtividade P, quando aplicável

VS(T,P) → excreção média anual de VS por cabeça de espécie/categoria T, para o sistema de produtividade P, quando aplicável em VS animal⁻¹ ano⁻¹

AWMS(T,S,P) → fração do VS anual total para cada espécie pecuária da categoria T

que é gerida no sistema de gestão de estrume S no país, para o sistema de produtividade P, quando aplicável; frações de SMDA adimensionais e específicas da região

$EF(T,S,P) \rightarrow$ fator de emissão para emissões diretas de CH_4 dos sistemas de manejo de dejetos S, por espécie animal/categoria T, no sistema de manejo de dejetos S, para o sistema de produtividade P, quando aplicável, $g CH_4/kg VS^{-1}$

S \rightarrow sistema de gestão de estrume

T \rightarrow Espécie/categoria de gado

P \rightarrow sistema de alta produtividade ou sistema de baixa produtividade para uso em Tier 1a avançado – omitido se estiver usando uma abordagem simples de Tier 1

Escolha do fator de emissão

Esta seção fornece duas alternativas para o desenvolvimento de fatores de emissão, com a seleção de fatores de emissão dependendo do método (ou seja, Nível 1 ou Nível 2) escolhido para estimar as emissões.

Equação 18

$$VS_{(T,P)} = \left(VS_{rate(T,P)} \cdot \frac{TAM_{T,P}}{1000} \right) \cdot 365$$

Onde :

$VS(T,P) \rightarrow$ excreção anual de VS para animais da categoria T, para sistema de produtividade P (quando aplicável), $kg VS animal^{-1} ano^{-1}$

$VS_{rate}(T,P) \rightarrow$ taxas de excreção padrão de VS, para sistema de produtividade P (quando aplicável), $kg VS (1000kg de massa animal)^{-1} dia^{-1}$.

$TAM(T,P) \rightarrow$ massa animal típica para pecuária categoria T, para sistema de produtividade P (quando aplicável), $kg animal^{-1}$

Tier 2

O método Tier 2 é aplicável quando a gestão do estrume é uma fonte chave ou quando os dados utilizados para desenvolver os valores padrão não correspondem bem às condições de gestão do gado e do estrume do país. Dado que as características do gado e os sistemas de gestão do estrume podem variar significativamente de país para país, os países com grandes populações destes animais devem considerar a utilização do método Tier 2 para estimar as emissões de metano.

Diesel

As emissões diretas da aplicação do fertilizante nitrogenado serão calculadas a partir da equação 19:

Equação 19

$$EFF_{\text{bsl.j.i.t}} = (FFC_{\text{bsl.j.i.t}} * EF_{\text{CO2}})$$