

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Larissa de Paula Carvalho Meira

Avaliação da emissão de gases de efeito estufa em uma pequena propriedade de agricultura familiar em Minas Gerais

Juiz de Fora

2025

Larissa de Paula Carvalho Meira

Avaliação da emissão de gases de efeito estufa em uma pequena propriedade de agricultura familiar em Minas Gerais

Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Sanitarista e Ambiental.
Área de concentração: Mudanças climáticas

Orientador: D. Sc Jonathas Batista Gonçalves Silva

Juiz de Fora

2025

Larissa de Paula Carvalho Meira

Avaliação da emissão de gases de efeito estufa em uma pequena propriedade de agricultura familiar em Minas Gerais

Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Sanitarista e Ambiental.

Aprovado em 18 de setembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Jonathas Batista Gonçalves Silva – Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Otávio Eurico de Aquino Branco

Universidade Federal de Juiz de Fora

Ma. Thais Girardi Carpanez

Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo elaborar um inventário de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em uma propriedade de agricultura familiar localizada no município de Caputira, Minas Gerais, utilizando as metodologias do IPCC e os inventários nacionais brasileiros. A análise considera as principais fontes emissoras do setor agropecuário na propriedade, sendo: fermentação entérica, manejo de dejetos e solos manejados e aplicação de calagem.

A propriedade rural analisada apresenta um sistema produtivo com ênfase na pecuária leiteira e no cultivo de culturas como café, milho e cana-de-açúcar. A estimativa das emissões totais de gases de efeito estufa (GEE) foi de 83,06 tCO₂e/ano. A principal fonte emissora identificada foi a fermentação entérica dos bovinos, responsável por 58,78% das emissões, seguida pelas emissões provenientes de solos manejados (39,03%) e do manejo de dejetos animais (2,19%).

Por outro lado, a presença de áreas de floresta nativa e lavouras de café na propriedade contribui para a remoção de carbono da atmosfera, atuando como importantes sumidouros de gases de efeito estufa. Com base em estimativas da literatura, o sequestro de carbono nessas áreas pode ser de aproximadamente 159,44 tCO₂e/ano, resultando em emissões líquidas de cerca de -76,38 tCO₂e/ano. Essa interação entre emissões e remoções evidencia o potencial da agricultura familiar não apenas como produtora de alimentos, mas também como agente relevante na mitigação das mudanças climáticas. Ao conservar a vegetação nativa e adotar práticas sustentáveis, o produtor rural contribui para o equilíbrio ambiental e fortalece os serviços ecossistêmicos essenciais à resiliência do setor agropecuário.

O estudo também propõe práticas sustentáveis alinhadas ao Plano ABC+, como o manejo eficiente de pastagens, compostagem, uso de biodigestores, adubação racional e sistemas agroflorestais, reforçando a importância da agricultura familiar na construção de uma agropecuária de baixo carbono.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, fermentação entérica, manejo de dejetos, solos manejados, agricultura familiar e mitigação de gases de efeito estufa.

ABSTRACT

This study aims to develop an inventory of greenhouse gas (GHG) emissions on a family farm located in the municipality of Caputira, Minas Gerais, using IPCC methodologies and Brazilian national inventories. The analysis considers the main emission sources in the agricultural sector: enteric fermentation, manure management, managed soils, and liming.

The farm analyzed has a production system with an emphasis on dairy farming and the cultivation of crops such as coffee, corn, and sugarcane. The estimated total greenhouse gas (GHG) emissions were 83.06 tCO₂e/year. The main emission source identified was cattle enteric fermentation, responsible for 58.78% of emissions, followed by emissions from managed soils (39.03%) and animal manure management (2.19%).

On the other hand, the presence of native forest areas and coffee plantations on the property contributes to the removal of carbon from the atmosphere, acting as important sinks for greenhouse gases. Based on literature estimates, carbon sequestration in these areas could be approximately 159.44 tCO₂e/year, resulting in net emissions of approximately -76.38 tCO₂e/year. This interaction between emissions and removals highlights the potential of family farming not only as a food producer but also as a relevant agent in mitigating climate change. By conserving native vegetation and adopting sustainable practices, rural producers contribute to environmental balance and strengthen ecosystem services essential to the resilience of the agricultural sector.

The study also proposes sustainable practices aligned with the ABC+ Plan, such as efficient pasture management, composting, the use of biodigesters, rational fertilization, and agroforestry systems, reinforcing the importance of family farming in building a low-carbon agriculture sector.

Keywords: Climate change, enteric fermentation, waste management, managed soils, family farming and greenhouse gas mitigation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação das emissões de setor agropecuário	14
Figura 2 – Mapa de localização do município de Caputira - MG	21
Figura 3 - Delimitação da propriedade	22
Figura 4 - Mapa de uso e cobertura da terra da propriedade de agricultura familiar	23
Figura 5- Fluxograma das fontes de emissões de GEE inventariadas	25
Figura 6 – Emissões no setor agropecuário (tCO _{2e}).....	57
Figura 7- Emissões de CH ₄ no subsetor de fermentação entérica (kg CH ₄ /ano)	59
Figura 8 - Emissões de CH ₄ no subsetor de manejo de dejetos (kg CH ₄ /ano)	62
Figura 9 - Emissões de N ₂ O no subsetor de manejo de dejetos (kg N ₂ O/ano)).....	63
Figura 10 – Representação esquemática da ordem de empilhamento dos compostos	64
Figura 11 – Esboço de sistema de biodigestão	65
Figura 12 – Emissões em solos manejados (tCO _{2e} /ano).....	66
Figura 13 - Emissões diretas e indiretas de diferentes fontes (kg N ₂ O/ano).....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cronologia das COPs de 1995 a 2024	8
Tabela 2– Rebanhos da propriedade.....	24
Tabela 3 – Global Warming Potencial dos principais GEE emitidos	26
Tabela 4 - Gases inventariados conforme as categorias dos setores de fermentação entérica .	27
Tabela 5- Resumo dos parâmetros de entrada para os cálculos de emissão de CH ₄ devido a fermentação entérica.....	30
Tabela 6 - Gases inventariados conforme as categorias dos setores de manejo de dejetos.....	32
Tabela 7 - Resumo dos parâmetros de entrada para os cálculos de emissão de CH ₄ devido o manejo de dejetos	37
Tabela 8 - Resumo dos parâmetros de entrada para os cálculos de emissão de N ₂ O devido o manejo de dejetos	38
Tabela 9 - Gases inventariados conforme as categorias/subcategoria dos setores de solos manejados e aplicação de calagem	40
Tabela 10 – Fatores de emissão para emissões diretas e indiretas.	49
Tabela 11 – Parâmetros para as emissões diretas e indiretas de solos manejados.	50
Tabela 12 – Fatores para o cálculo de aplicação de calcário.....	56
Tabela 13 – Emissões no setor agropecuário.....	57
Tabela 14 – Fatores de emissão de CH ₄ na propriedades x fator de emissão da literatura	60
Tabela 15- Fatores de emissão de CH ₄ na propriedades x fator de emissão da literatura	62

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	5
2.	OBJETIVO	6
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	7
3.1	Mudanças climáticas: um panorama histórico	7
3.2	Emissões do setor agropecuário	14
3.3	Agricultura familiar e a sua importância	17
3.4	Manejo conservacionista com vistas à redução de emissão de gases de efeito estufa. 19	
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
4.1	Caracterização do município de Caputira – MG	20
4.2	Caracterização da propriedade	21
4.3	Cálculo das emissões.....	24
4.3.1	Fermentação entérica.....	26
4.3.1.1	Equações para emissão de fermentação entérica	27
4.3.1.2	Dados da atividade de fermentação entérica	30
4.3.2	Manejo de dejetos.....	31
4.3.2.1	Equações das emissões de CH ₄ por meio manejo de dejetos	32
4.3.2.2	Equações das emissões diretas e indiretas de N ₂ O por meio manejo de Dejetos ..	34
4.3.2.3	Dados da atividade para o cálculo das emissões de CH ₄ e N ₂ O por meio de manejo de dejetos	36
4.3.3	Solos manejados e aplicação de calagem.....	39
4.3.3.1	Equações das emissões diretas e indiretas de solos manejados	41
4.3.3.2	Dados da atividade para os cálculos das emissões diretas e indiretas de N ₂ O.....	49
4.3.3.3	Calagem.....	55
4.3.3.4	Dados da atividade para os cálculos das emissões de CO ₂	56
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1	Emissões totais do setor agropecuário na propriedade.....	56
5.2	Emissões Totais na Fermentação Entérica	58
5.3	Emissões totais no manejo de dejetos	61
5.4	Emissões totais de solos manejados	65

5.5	Agricultura familiar como aliada na mitigação climática: caminhos para o mercado de PSA e sustentabilidade rural	69
6.	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

APRESENTAÇÃO

O Presente trabalho foi elaborado e avaliado no formato de monografia, de acordo com as normas definidas Resolução nº 17/2023 do Colegiado do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da UFJF, como pré-requisito para aprovação na disciplina Trabalho Final de Curso II(ESA098).

1. INTRODUÇÃO

A preocupação do mundo com as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) tem sido evidenciada de forma relevante nos últimos anos, principalmente se tratando do crescente desenvolvimento e criação das indústrias. Durante a terceira Conferência das Partes, COP-3, em 1997, foi estabelecido o Protocolo de Quioto, acordo assinado entre 84 países, tendo como objetivo a diminuição de emissões de gases de efeito estufa, em especial o dióxido de carbono (CO_2), traçando metas quantitativas e ações a serem adotadas para o comprimento das estratégias (Andrade, Costa, 2008).

Uma importante iniciativa para o estudo das mudanças climáticas foi a criação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). O IPCC é responsável por elaborar relatórios científicos, técnicos e socioeconômicos sobre as mudanças climáticas, além de propor metodologias para calcular as emissões e remoções de Gases de Efeito Estufa (GEE). Desta forma, o painel contribui significativamente para a avaliação dos impactos e riscos futuros das mudanças climáticas e desempenha um papel fundamental na conscientização dos países, incentivando a adoção de ações mitigadoras para reduzir os riscos e impactos adversos provocados pelo aumento das emissões (IPCC, 2025).

Baseado nas diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) para o cálculo de emissões e remoções de Gases de Efeito Estufa (GEE), e no compromisso do Brasil com a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), o país tem a responsabilidade de elaborar e atualizar os inventários nacionais das emissões antrópicas por Fontes e Remoções Antrópicas por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa (GEE) não controlados no Protocolo de Montreal (Brasil, 2022).

Segundo o Resultado do Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa por Unidade Federativa dentre as principais emissões de GEE no estado de Minas Gerais em 2016, o setor agropecuário se destaca como o maior gerador de emissões, totalizando 56.664 Gg CO_2e , ou seja, cerca de 45% das emissões no estado, seguindo as emissões totais dos setores de Energia, Processos Industriais e Uso de Produtos (IPPU) e Resíduos (Brasil, 2022). Ainda no setor agropecuário, a maior contribuição ocorre através da fermentação entérica, representando 56% das emissões. Em relação às ações de remoção GEE, em Minas Gerais apresentou resultados positivos, removendo aproximadamente 12.387 Gg CO_2e , por meio do sequestro de CO_2 pela vegetação nativa e áreas de reflorestamento, conforme apresentado no inventário nacional.

Segundo o IBGE (2023), a produção do setor agropecuário em Minas Gerais está intrinsecamente vinculada às atividades agrícolas, como o cultivo de café, soja, cana-de-açúcar, milho em grão, batata, banana e entre outros. E as atividades de pecuária estão relacionadas a: galináceos, bovinos, suínos, codornas e outros. Nos estabelecimentos agropecuários do estado, conforme o Censo Agropecuário de 2017 do IBGE, a agricultura familiar representa 76,8% dos estabelecimentos agropecuários e foi responsável por 23% do valor da produção no estado (IBGE, 2019).

A agricultura familiar desempenha um papel crucial no estado de Minas Gerais e no país, trazendo benefícios significativos em relação às mudanças climáticas. Segundo Gomes e Cardoso (2021), esse tipo de sistema a produção de plantas é mais diversificado gerando maior biomassa e proteção do solo, contribuindo assim para o sequestro de carbono da atmosfera. Além disso, na agricultura familiar tende a ter menores emissões associadas ao setor de energia, visto que possui baixa mecanização e automação das atividades realizadas, além da comercialização ser mais local, contribuindo na diminuição das emissões provenientes do uso de combustíveis fósseis no transporte (Gomes; Cardoso, 2021).

Desse modo, é importante avaliar e entender o comportamento que a agricultura familiar possui quanto as emissões atmosféricas. A partir disso, seguindo as metodologias sugeridas pelo IPCC em conjunto com as informações abordadas nos inventários nacionais do Brasil e revisões de literatura foi realizado o inventário de uma propriedade de agricultura familiar no estado de Minas Gerais, calculando as emissões de dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4). Analisando de forma crítica a sua influência para as emissões e remoções de GEE, além de analisar iniciativas gerais impostas pelo Brasil que contribuem para o sequestro de carbono no setor agropecuário.

2. OBJETIVO

Elaborar inventário de emissão GEE, através das emissões de dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4), considerando as atividades mais abrangentes do setor agropecuário na propriedade de agricultura familiar no município de Caputira, estado de Minas Gerais. Levando em conta as metodologias estabelecidas pelo IPCC e dos inventário nacionais do Brasil. E assim, entender o comportamento de forma crítica da agricultura familiar quanto

as mudanças climáticas e verificar ações que contribuem para um desenvolvimento sustentável das atividades agropecuárias.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Mudanças climáticas: um panorama histórico

As Nações Unidas definem as mudanças climáticas como variações conforme o tempo nos padrões de temperatura e clima, sendo elas naturais ou antrópicas (ONU, 2025). No entanto, com o aumento da queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás, além da intensificação da degradação ambiental, as emissões de gases de efeito estufa tornaram-se uma preocupação crescente (Freitas, 2016).

As discussões sobre as mudanças climáticas têm sido pauta em nível global por várias décadas, incluindo acordos internacionais, diversas conferências e protocolos. Em 1992, no Rio de Janeiro, foi realizada a Rio-92 ou chamada de Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, nela foi adotado a Convenção - Quadro das Nações Unidas (em inglês, *United Nations Framework Convention on Climate Change* ou UNFCCC), com intuito de discutir as mudanças climáticas e estabilizar as emissões de gases de efeito estufa causadas pelas atividades antrópicas, ela teve a participação de 179 países, em que se comprometeram a trabalhar de forma colaborativa para enfrentar as medidas de mitigação e financiamento (Freitas, 2016). A UNFCCC foi assinada em 1992, mas entrou em vigor em 21/03/1994.

Dentro os componentes definidos pela UNFCCC foram criadas as Conferências das Partes (COP), que são reuniões anuais onde reúne os países signatários para discutir e tomar decisões quanto às mudanças climáticas, levando em consideração os aspectos de cada país (UNFCCC, 2024). A COP serve como um espaço para negociações, onde os países podem avaliar o progresso na implementação da UNFCCC e estabelecer novos compromissos (Cenamo, 2004). Dentre as obrigações estão: revisão das obrigações das partes, avaliação de mecanismos institucionais, análise de impactos, intercâmbio de informações, desenvolvimento de metodologias, elaboração de inventários, relatórios periódicos, recomendações e mobilização. As obrigações possuem um papel de auxiliar a comunidade internacional a trabalhar de forma colaborativa e eficaz na luta contra as mudanças climáticas.

As reuniões da COP tiveram início em 1995, atualmente ela se encontra em sua 30ª edição, onde em cada reunião ocorre em um país signatário. A Tabela 1 aborda de forma cronológica as conferências realizadas até o momento.

Tabela 1 – Cronologia das COPs de 1995 a 2024

COP	Ano	Local	Assuntos
1	1995	Berlim (Alemanha)	Tratativas para a criação de um protocolo multilateral, com ações e diretrizes específicas voltadas para o enfrentamento das mudanças climáticas. Foi debatido a criação de <i>hard law</i> que estipulasse metas quantificáveis e prazos definidos, com o objetivo de promover a redução das emissões de gases de efeito estufa por ações antrópicas e identificação dos sumidouros de carbono.
2	1996	Genebra (Suíça)	A partir do Segundo Relatório do IPCC, as discussões sobre metas obrigatórias de redução de emissões e mecanismos complementares ganharam força nas conferências climáticas internacionais.
3	1997	Quioto (Japão)	Assinado por 84 países o Protocolo de Quioto.
4	1998	Buenos Aires (Argentina)	Discussões para ratificar e implementar o Protocolo de Quioto.
5	1999	Bonn (Alemanha)	Discussões sobre o uso da terra, mudança de uso da terra e florestas. Importância de capacitação dos países em desenvolvimento.
6	2000	Haia (Holanda)	Negociação suspensa por discordâncias dos Estados Unidos, no qual saiu pois não concordava com a inexistência de metas concretas de redução para os países em desenvolvimento, tendo como consequência aumento do ônus da redução das emissões sem a adoção de mecanismos de flexibilização.
7	2001	Marrakesh (Marrocos)	Foram estabelecidas regras para a formulação do inventário nacional de emissões, além da normatização dos instrumentos de flexibilização, com definição das diretrizes operacionais do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), das medidas de implementação conjunta e do comércio de emissões. Essas ações contribuíram para ampliar as adesões ao Protocolo de Quioto. Também foram definidas penalidades para os países que não cumprissem os compromissos assumidos no acordo.
8	2002	Nova Deli (Índia)	Poucos resultados foram discutidos. Houve impacto com a saída dos Estados Unidos para a vigência do Protocolo de Quioto.
9	2003	Milão (Itália)	Foram estabelecidas diretrizes para o uso e mudança de uso do solo e das florestas, incluindo regras específicas para atividades de florestamento e reflorestamento. Essas normas também regulamentaram a obtenção de

			créditos de carbono no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).
10	2004	Buenos Aires (Argentina)	Início da vigência do Protocolo de Quioto no período de 2008 a 2012 com a aderência da Rússia. Definição de regras para implementação e discussões de termos do segundo regime do Protocolo de Quioto, a partir de 2013.
11	2005	Montreal (Canadá)	Emissões de GEE provenientes do desmatamento e do uso inadequado da terra. Necessidade da harmonização do desenvolvimento sustentável com as medidas de mitigação e adaptações às mudanças climáticas.
12	2006	Nairóbi (Quênia)	Regulamentação do Fundo de Adaptação e pela proposta de mecanismo flexibilizado, elaborada pelo Brasil, que não foi aprovada naquele momento, mas evoluiu para a criação da redução de emissões por desmatamento e degradação florestal (<i>REDD</i> na sigla em inglês).
13	2007	Bali (Indonésia)	Adesão da Austrália ao Protocolo de Quioto. Estabelecimento de medidas para combater as mudanças climáticas nos países em desenvolvimento, no que se refere à mitigação, adaptação, financiamento, tecnologia e capacitação. Implementação do fundo de adaptação para financiamento de tecnologia limpa nos países em desenvolvimento.
14	2008	Poznan (Polônia)	Não apresentou resultados significativos, mas os países em desenvolvimento demonstraram interesse em assumir compromissos de redução das emissões, sem que fosse apresentada uma proposta específica.
15	2009	Copenhague (Dinamarca)	Expectativas em estabelecer um novo acordo que substituísse o Protocolo de Quioto, mas isso não ocorreu. Foi firmado o Acordo de Copenhague, no qual os países, incluindo aqueles em desenvolvimento, se comprometeram a estabelecer metas para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Foi discutida a meta de limitar o aumento da temperatura da superfície da Terra a 2°C.
16	2010	Cancun (México)	Foi oficializada a meta de limitar o aumento da temperatura global a 2 °C, com a possibilidade de reduzi-la para 1,5 °C, conforme avanços científicos e compromissos internacionais. Também foi criado o Fundo Climático Verde, destinado a apoiar ações de mitigação e adaptação nos países em desenvolvimento. Além disso, reconheceu-se a relevância da atuação dos governos subnacionais no enfrentamento das mudanças climáticas.
17	2011	Durban (África do Sul)	Os países se reuniram para discutir a redução das emissões, inclusive os Estados Unidos, China e Índia estabelecendo um segundo período de

			compromissos, a ser adotado a partir de 2015. Apenas o Canadá, Japão e Rússia não ficaram de acordo com as metas de redução, isentando-se dos compromissos formais. Foi firmada a Plataforma de Durban direcionando as discussões até 2013, propondo a estruturação do Fundo Verde, visando a obtenção de recursos financeiros para subsidiar ações de mitigação e adaptação em países em desenvolvimento.
18	2012	Doha (Catar)	Protocolo de Quioto prorrogado no período de 2013 a 2020, firmando o compromisso de reduzir 18% das emissões dos países em desenvolvimento, tendo como base as emissões de 1990. Além disso, foi estabelecido o acordo de subsidiar as negociações e aprovação de um novo documento em 2015, objetivando as responsabilidades históricas de cada país, de caráter obrigatório e equitativo a todos.
19	2013	Varsóvia (Polônia)	Estabelecimento de mecanismo de flexibilização, possuindo como base o ano de 2015, para cada país apresentar o seu compromisso com as mudanças climáticas. Além de cada um ser responsável por realizar consultas nacionais para definir o seu comprometimento.
20	2014	Lima (Peru)	Os países desenvolvidos concordaram em fazer concessões para permitir o avanço de uma nova fase do regime, reconhecendo sua responsabilidade histórica em relação às emissões de gases de efeito estufa. As nações desenvolvidas teriam que assumir obrigações mais significativas em comparação com aquelas que seriam atribuídas aos países em desenvolvimento. Além disso, foi definido que na COP 21, os países teriam que apresentar as suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs).
21	2015	Paris (França)	Firmado o Acordo de Paris entre 195 países, possuindo como meta limitar o aumento da temperatura média global a 1,5°C, com relação aos níveis industriais. O acordo estabeleceu compromissos de redução de emissões e financiamento climático para apoiar países em desenvolvimento, mas não estabeleceu metas vinculativas para os países.
22	2016	Marrakeck (Marrocos)	Implementação do Acordo de Paris, possuindo como um elemento importante a elaboração de estratégias para a implementação das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC). Além do estabelecimento de um processo de monitoramento que possibilite a comparação entre os esforços reais dos países desenvolvidos, com base nas metas de redução de emissões.

23	2017	Bonn Alemanha	Avaliação coletiva dos avanços contra o combate às mudanças climáticas. Continuação das regras de implementação do Acordo de Paris.
24	2018	Katowice Polônia	Definição das regras de implementação do Acordo de Paris, abordando a forma que os países devem relatar as suas emissões.
25	2019	Madrid (Espanha)	Negociações sobre o Mercado de Carbono sem sucesso, devido a falta de consenso sobre as regras. Marcada também pelo o movimento ativista em alta, que relataram a importância e a urgência de realizar o combate às mudanças climáticas.
26	2021	Glasgow (Reino Unido)	Foi marcada pelo avanço nas negociações sobre o Mercado de Carbono e pelas discussões em torno das emissões de metano, resultando em acordos para a redução desse gás. Diversos países também assumiram compromissos para eliminar gradualmente o uso do carvão e acelerar a transição energética. Além disso, foram anunciados mecanismos de financiamento climático voltados ao apoio de países em desenvolvimento na adaptação às mudanças climáticas.
27	2022	Sharm El-Sheikh (Egito)	Foi elaborado o Fundo de Perdas e Danos: objetivando compensar os países mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas, como desastres naturais e perda de recursos. Discussões sobre Justiça Climática, tendo ênfase na necessidade de uma transição justa para economias de baixo carbono e no aumento do financiamento climático para adaptação.
28	2023	Dubai (Emirados Árabes Unidos)	Discussões sobre a implementação prática das metas do Acordo de Paris e fortalecimento dos compromissos dos países de reduzir as emissões. Foco na descarbonização do setor Energético, como indústrias e transporte. Debate sobre financiamentos dos projetos climáticos, principalmente para países desenvolvidos.
29	2024	Baku (Azerbaijão)	Apoio financeiro até 2035 para países em desenvolvimento na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas e na transição de fontes de energia mais sustentáveis. Definição de regras para Comércio de Carbono, possuindo apoio da ONU para facilitar e monitorar o comércio internacional de créditos de carbono, visando aumentar a transparência e a eficácia desses mecanismos.

Fonte: Adaptado de Granziera; Rei (2015).

Dentre os marcos citados em cada COP o Protocolo de Quioto foi fundamental para as discussões acerca das mudanças climáticas e relatórios para países desenvolvidos. No protocolo

foi abordado compromissos de metas de redução de emissões de gases de efeito estufa para os países do Anexo I da Convenção do Clima (países desenvolvidos), no qual foi estabelecido que eles deveriam reduzir as emissões em média 5,2% com relação aos níveis de 1990, durante o período de 2008 a 2012. Já os países em desenvolvimento não foram estabelecidas metas obrigatórias, mas eles poderiam participar das iniciativas de financiamento e cooperação (Freitas, 2016).

No Protocolo de Quioto como formas de ajudar os países a atingirem as suas metas de redução de GEEs foi proposto Mecanismo de Flexibilidade, como: Comércio de Emissões (Cap-and-Trade) que permitia a compra de créditos de carbono para os países que não atingissem suas metas; Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), países desenvolvidos poderiam financiar projetos de redução de emissões em países em desenvolvimento e adquirindo créditos de carbono, o Brasil foi amplamente utilizado para isso; e Implementação Conjunta (IC), semelhante ao MDL, mas uma das principais diferenças está ligada aos projetos de redução de emissões ocorrem entre países desenvolvidos (Moreira; Giometti, 2008).

Durante a sua vigência, o protocolo previa revisões para avaliar o progresso e fazer ajustes, sendo a maior delas em 2012, com a Emenda de Doha, que definiu novas metas de emissões no período de 2013 a 2020 (Freitas, 2016).

Outro marco importante foi o Acordo de Paris, que estabeleceu metas de redução das emissões de dióxido de carbono a partir de 2020. Para alcançar os objetivos de redução conforme descrito na

Tabela 1, os países elaboraram as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), permitindo que os países determinassem metas de redução e que compensasse suas emissões através de projetos de mitigação (CNI, 2023). O Acordo de Paris propõe que as metas sejam revisadas a cada cinco anos, sendo mais criteriosas a cada ciclo.

As NDCs são determinadas de forma individual por cada país, com isso os países possuem a liberdade de definir as suas próprias metas conforme as suas emissões de GEEs. Além disso, os países possuem a obrigação de comunicar publicamente a NDC (CNI, 2023)

O Brasil como um dos países participantes do Acordo de Paris, determinou na sua NDC alguns dos seguintes compromissos: em comparação ao ano de 2005, ele definiu reduzir 48,4 % das emissões de gases de efeito estufa até o ano 2025 e até o ano 2030 reduzir 53,1% e reforçou a neutralidade climática até o ano de 2050 (Talanoa, 2023). Vale ressaltar que a NDC passou por processo de revisão à UNFCCC em 3 de novembro de 2023.

Além disso, destaca-se a Política Nacional sobre Mudanças do Clima (PNMC), instituída pela Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que tem como objetivo estabelecer

diretrizes para o enfrentamento das mudanças climáticas no Brasil. A PNMC busca alinhar o país aos seus compromissos internacionais, como a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) e o Acordo de Paris. Essa política visa criar um marco normativo e institucional para promover ações de mitigação e adaptação, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e para o aumento da resiliência nacional frente aos impactos climáticos.

De acordo com a PNMC, como compromisso voluntário, o Brasil visou a adoção de ações que diminuíssem entre 36,1% e 38,9% as emissões projetadas até 2020. Para atingir esses objetivos, uma das iniciativas criadas foi o Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC). O Plano ABC aborda ações de mitigação e adaptação às mudanças climáticas no setor agropecuário, ou seja, incentivo aos produtores rurais a adotarem tecnologias e práticas que contribuam para o aumento da produtividade e em concomitância visem diminuir os impactos ambientais, através de programas como: Recuperação de Pastagens Degradadas; Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) e Sistemas Agroflorestais (SAFs); Sistema Plantio Direto (SPD); Fixação Biológica do Nitrogênio (FBN); Florestas Plantadas; Tratamento de Dejetos Animais e Adaptação às Mudanças Climáticas (Brasil, 2012).

O Plano ABC teve vigência até o ano de 2020, posteriormente foi adotado o Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária com Vistas ao Desenvolvimento Sustentável (Plano ABC+), a sua vigência foi a partir de 2020 e se estende até o ano de 2030. Em comparação com o Plano ABC, o Plano ABC+ busca ampliar a abrangência e a eficácia das ações de mitigação às mudanças climáticas, adaptando a necessidade de modernização e desafios climáticos atuais (Conceição, 2022).

O Plano ABC+ busca integrar práticas agrícolas e pecuárias que contribuam para a redução das emissões de gases de efeito estufa, ao mesmo tempo que visa prever a resiliência dos sistemas produtivos frente aos impactos climáticos. Para atingir as metas do ABC+, o Ministério da Agricultura e Pecuária, cita conceitos fundamentais, como a Abordagem Integrada da Paisagem (AIP), Combinação de Estratégias de Adaptação e Mitigação, e o estímulo à adoção e manutenção de Sistemas, Práticas, Produtos e Processos de Produção Sustentável (SPSABC). Dentre dessas bases conceituais, é detalhado também diversas estratégias, como a promoção à adoção e manutenção de SPSABC, incentivo à regularização ambiental das propriedades rurais, transferência de tecnologia, capacitação e assistência técnica, estímulo e apoio à pesquisa científica e desenvolvimento tecnológico (Brasil, 2021).

Através das iniciativas abordadas de forma internacional e nacional é possível identificar a importância da temática de mudanças climáticas no contexto agropecuário, em especial na agricultura de baixo carbono.

3.2 Emissões do setor agropecuário

De acordo com o IPCC (2019a) os principais gases de efeito estufa são o dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4). Os fluxos de CO_2 entre a atmosfera e os ecossistemas são influenciados pela absorção do CO_2 por meio da fotossíntese realizada pelas plantas, e pela sua liberação através da respiração, decomposição de matéria orgânica e processos de combustão. O N_2O é liberado através dos processos de nitrificação e desnitrificação no ecossistema. Já o gás CH_4 é emitido em condições anaeróbicas nos solos e no armazenamento de esterco, proveniente da metanogênese, além de ser gerado pela fermentação entérica, e também pela combustão incompleta de matéria orgânica durante a queima (IPCC, 2019a). Através da

Figura 1 é possível identificar de forma esquemática as emissões no setor agropecuário.

Figura 1: Representação das emissões de setor agropecuário



Fonte: Brasil (2022).

No setor agropecuário esses gases são emitidos através dos subsetores de fermentação entérica, manejo de dejetos, solos manejados, cultivo de arroz, queima de resíduos, calagem e aplicação de ureia (Brasil, 2022). Abaixo é abordado como se dá a emissão dos gases de efeito estufa através de cada uma das atividades do setor agropecuário.

Fermentação Entérica: A fermentação entérica faz parte do sistema digestivo dos animais ruminantes, como as vacas, ovelhas, cabras e búfalos. Durante a fermentação entérica os microrganismos (bactérias, protozoários e fungos) transformam os carboidratos celulósicos

em ácidos graxos de cadeia curta (AGCC), como o ácido acético, propiônico e butírico. Durante essa conversão são gerado gases (principalmente metano) e outros produtos, que são eliminados pela boca e narinas por meio de eructação e respiração, fazendo com que ocorra perda de energia do animal (Brasil, 2020a). Este processo ocorre no rúmen, que é uma das câmaras do estômago desses animais, ou no ceco dos animais não ruminantes (cavalos, mulas e asnos).

Manejo de Dejetos: Segundo o IPCC (2019b) o termo “dejeito” é usado para se referir ao estrume (sólido) e a urina (líquido) produzido pelos animais. O estrume, durante o seu processo de decomposição em condições anaeróbicas, seja no tratamento ou armazenamento, gera como um dos principais gases, o metano (CH_4). As emissões de CH_4 podem aumentar ou diminuir dependendo de fatores como quantidade de dejeito produzido (relacionado à população animal), temperatura e tempo de armazenamento do dejeito. Além disso, resíduos tratados em estados líquidos, em sistemas como lagoas, tanques ou fossas, tendem a produzir maiores quantidades de metano. Por outro lado, o manuseio dos resíduos em forma sólida ou através de pastagens tende a produzir menos GEE, devido a decomposição ser realizada em condições aeróbicas. (IPCC, 2019b).

Outro gás gerado no manejo de dejetos é o óxido nitroso (N_2O), as emissões podem ocorrer de forma direta ou indireta. As emissões diretas são causadas pela nitrificação e desnitrificação do nitrogênio presente no esterco, possuindo como influência para o armazenamento e o tratamento do dejeito. Já as emissões indiretas são geradas pela perda de nitrogênio por volatilização, ocorrendo principalmente nas formas de amônia e NO_x . O nitrogênio orgânico excretado é mineralizado em nitrogênio amoniacal, a quantidade de emissão indireta está ligada ao tempo de tratamento, temperatura do local e suprimento de oxigênio (IPCC, 2019b).

Solos Manejados: O manejo dos solos está associado às mudanças causadas pelo homem no solo, principalmente no que tange às atividades agrícolas, visando o desenvolvimento de culturas, qualidade e produtividade (Melo *et al.*, 2019). Algumas das práticas de manejo contribuem para o aumento dos gases de efeito estufa devido à adição de nitrogênio (N), visando o rendimento de culturas (IPCC, 2019c).

Segundo o IPCC (2019c) com a maior disponibilidade de N no solo gera o aumento das taxas de nitrificação e desnitrificação o que favorece a formação natural do óxido nitroso (N_2O). A nitrificação é o processo de oxidação aeróbia em que as bactérias nitrificantes convertem o

amônio em nitrato através de dois processos intermediários, primeiro as bactérias convertem o amônio em nitrito e depois elas realizam a conversão de nitrito em nitrato. Enquanto, a desnitrificação ocorre em ambiente anaeróbico pelas bactérias desnitrificantes, o nitrato é utilizado como aceptor de elétrons e o reduzem a gases como o nitrogênio molecular (N_2) e o N_2O (PROSAB, 2009).

As emissões de N_2O podem ocorrer de forma direta ou indireta. As emissões diretas acontecem quando o nitrogênio é liberado ou adicionado diretamente ao solo, enquanto as emissões indiretas podem ser desencadeadas por diversos fatores, como a volatilização de NH_3/NO_x , além da lixiviação e escoamento superficial de N mineral (IPCC, 2019c). As atividades antrópicas que podem gerar as emissões de N_2O estão relacionadas ao uso de fertilizantes sintéticos ou orgânicos, esterco, resíduos de colheitas, lodo de esgoto ou à mineralização do N presente na matéria orgânica do solo, especialmente após processos como drenagem e manejo de solos orgânicos (IPCC, 2019c).

Cultivo de Arroz: O cultivo de arroz quando é realizado em regime de irrigação por inundação do solo contribui para as emissões de GEE. Isso ocorre porque o solo alagado cria condições anaeróbicas, favorecendo a decomposição da matéria orgânica por bactérias metanogênicas, que liberam gás metano na atmosfera (Brasil, 2020b).

Segundo o IPCC (2019d) o cultivo de arroz inundado possui três subcategorias sendo elas: inundação contínua, inundação intermitente com aeração única e inundação intermitente com aeração múltipla. Na inundação contínua o solo permanece alagado durante o período de cultivo do arroz; na segunda subcategoria o solo é alagado, mas passa por um único período de drenagem durante o cultivo; e na inundação intermitente com aeração múltipla o solo é alagado e passa por vários períodos de drenagem. A produção de arroz no Brasil se dá majoritariamente pela subcategoria de inundação contínua (Brasil, 2020b; IPCC, 2019d).

Queima de Resíduos Agrícolas: Os resíduos agrícolas são remanescentes da produção de diversas culturas, compostos principalmente por folhas e hastes das plantas, conhecidas como palha. Quando esses resíduos se decompõem no próprio local de plantio, desempenham um papel essencial na proteção do solo, reduzindo o impacto direto das chuvas e diminuição da velocidade do escoamento superficial, ajudando a mitigar problemas ambientais associados a erosão do solo, por exemplo (Brasil, 2020c).

Segundo o Inventário Nacional de Queima de Resíduos, no Brasil ocorre majoritariamente pela cana-de-açúcar. A queima geralmente está associada a diminuição de resíduos no local, limpeza de lavouras e combate às pragas (Brasil, 2020c). Durante a combustão, diferentes gases de efeito estufa são liberados. A queima com chama gera óxido nitroso (N_2O) e óxidos de nitrogênio (NO_x), enquanto a queima com presença de fumaça favorece a formação de metano (CH_4) e monóxido de carbono (CO). (Brasil, 2020c).

Diante dos impactos ambientais causados pela queima de resíduos agrícolas, diversas normas têm sido propostas e implementadas para regular ou restringir essa prática. Em Minas Gerais, a Assembleia Legislativa (ALMG) discutiu o Projeto de Lei nº 1.685/2015, que dispõe sobre a eliminação gradual do uso de fogo em plantação de cana-de-açúcar. Além disso, a Resolução Conjunta SEMAD/IEF nº 2.988/2020 estabelece critérios para o uso do fogo em atividades agropastoris, exigindo autorização prévia dos órgãos ambientais e priorizando alternativas sustentáveis ao manejo com fogo.

Aplicação de calagem e ureia: A calagem é o processo de aplicação de calcário no solo, que possui como principal função corrigir a sua acidez, elevando o pH. Esse processo fornece cálcio (Ca) e magnésio (Mg), elementos essenciais que contribuem para o crescimento saudável das plantas e para a melhor disponibilidade de nutrientes no solo. No entanto, o calcário contém carbono em sua composição, predominantemente na forma de carbonato de cálcio. Durante sua reação com o solo, ocorre a liberação de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, contribuindo para a emissão de gases de efeito estufa (GEE) (Brasil, 2020d).

Quanto à aplicação de ureia ela é usada para aumentar a concentração de N no solo e favorecer o crescimento das plantas. Ela possui C em sua composição, que é proveniente de fontes fósseis utilizadas na produção de energia da amônia. Quando ela entra em contato com o solo sofre processo de hidrólise que libera amônio para as plantas e CO_2 para a atmosfera (Brasil, 2020d).

3.3 Agricultura familiar e a sua importância

Agricultura familiar pode ser definida segundo a Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006 em seu Art. 3º, como:

“considera-se agricultor familiar e empreendedor familiar rural aquele que pratica atividades no meio rural, atendendo, simultaneamente, aos seguintes requisitos: I - não detenha, a qualquer título, área maior do que 4 (quatro) módulos fiscais; II - utilize predominantemente mão-de-obra da própria família nas atividades econômicas do seu estabelecimento ou empreendimento; III - tenha percentual mínimo da renda familiar originada de atividades econômicas do seu estabelecimento ou empreendimento, na forma definida pelo Poder Executivo; IV - dirija seu estabelecimento ou empreendimento com sua família” (BRASIL, 2006).

A agricultura familiar desempenha um papel crucial na alimentação das populações, especialmente em áreas rurais. Ela contribui para o abastecimento dos mercados locais e para a diversidade alimentar das famílias, oferecendo uma dieta equilibrada e acessível. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) os pequenos produtores representam mais de 608 milhões de propriedades de agricultura familiar no mundo, abrangendo entre 70 a 80% das terras agrícolas, sendo responsáveis por cerca de 80% da produção global de alimentos (FAO, 2021). Na região sudeste, Minas Gerais é o estado com o maior número de estabelecimentos de agricultura familiar e o segundo do país (ficando atrás com a Bahia), os estabelecimentos estão concentrado nas mesorregiões de Sul/ Sudoeste de Minas (18,4%), Norte de Minas (17,4%) e Zona da Mata (15,5%) (Fortini, 2021).

Segundo Fortini (2021) em Minas Gerais, a pecuária é a principal atividade, representando quase três quartos da área ocupada pelos estabelecimentos de agricultura familiar, estando presente em 57,8% desses estabelecimentos. Já o cultivo agrícola é dividido em lavouras permanentes e temporárias, a primeira classificação está presente em 19,7% dos estabelecimentos, ocupando 10,5% da área, enquanto as lavouras temporárias correspondem a 16,4% dos estabelecimentos e 13,2% da área utilizada.

Na pecuária mineira, a criação de animais é predominantemente de aves, especialmente galinhas, galos e frangas, que representam 79,4% do total. Em seguida, destaca-se a criação de bovinos, com 13,8%, e, em terceiro lugar, os suínos, com 3,4% (IBGE, 2017a). Em relação às lavouras permanentes, que são aquelas cultivadas por vários anos sem a necessidade de replantio após cada colheita, predominam o café arábica, a banana, o café canephora (conilon) e a tangerina mexicana. Já nas lavouras temporárias, que precisam ser plantadas a cada safra,

os principais cultivos são de milho em grão, milho forrageiro, cana-de-açúcar e soja (Fortini, 2021).

Esses números evidenciam a diversidade produtiva típica da agricultura familiar, que combina diferentes culturas agrícolas com atividades pecuárias. Essa variedade é essencial para garantir a segurança alimentar das famílias, reduzir os impactos de eventuais perdas de produção e permitir o uso de práticas mais sustentáveis, como a rotação de culturas e o aproveitamento de insumos naturais da própria propriedade.

3.4 Manejo conservacionista com vistas à redução de emissão de gases de efeito estufa.

De acordo com a FAO (2022), o manejo conservacionista é um sistema agrícola sustentável que busca prevenir a degradação do solo e promover sua regeneração, com base em três princípios fundamentais: o mínimo revolvimento do solo, manutenção de cobertura vegetal permanente e diversificação de espécies cultivadas. Esses princípios favorecem o aumento da biodiversidade, a melhoria da estrutura do solo e a eficiência no uso da água e dos nutrientes, contribuindo para uma produção agrícola mais resiliente e ambientalmente equilibrada.

Segundo Fortini (2021), aproximadamente 52,9% dos estabelecimentos de agricultura familiar em Minas Gerais não adotam nenhuma prática de conservação do solo. Esse dado evidencia uma necessidade de ações voltadas ao manejo sustentável do solo, o que compromete tanto a produtividade agrícola quanto a preservação ambiental. A ausência dessas práticas favorecem processos como: erosão, empobrecimento da terra, assoreamento de corpos d'água e perda da capacidade produtiva das áreas cultivadas. Por outro lado, a adoção de práticas conservacionistas, como o plantio direto, a rotação de culturas e a manutenção da cobertura vegetal, contribui para a melhoria da estrutura e fertilidade do solo, além de promover maior equilíbrio ecológico e segurança na produção a longo prazo.

Outro benefício da adoção de práticas conservacionistas é a contribuição da mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo fortemente recomendadas no escopo do Plano ABC+, que orienta a transição para uma agricultura de baixa emissão de carbono e mais resiliente às mudanças climáticas. Segundo Cerri *et al.* (2024), algumas estratégias para contribuir no sequestro de carbono (C) no solo incluem Sistema de Plantio Direto (SPD), Sistemas Integrados de Cultivo e Manejo Adequado de Pastagens.

O Sistema de Plantio Direto é caracterizado pela semeadura sem preparo prévio do solo, pela cobertura permanente com palha ou plantas vivas e pela diversificação de culturas por

meio da rotação. Esses princípios minimizam o revolvimento do solo e contribuem para o aumento do estoque de carbono, maior retenção de água e intensificação da atividade microbiana no solo (Cerri *et al.*, 2024). No caso dos sistemas integrados de cultivo, como a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), por exemplo, há a combinação de atividades agrícolas, pecuárias e florestais em uma mesma área. Esses sistemas são eficazes na recuperação de pastagens degradadas, na melhoria da qualidade do solo, no aumento do estoque de carbono e na ampliação da oferta de alimentos, fibras e serviços ecossistêmicos (Cerri *et al.*, 2024). Já o manejo adequado de pastagens envolve o uso de práticas sustentáveis para manter ou recuperar a produtividade do pasto, evitando a degradação do solo e da vegetação, alguns exemplos é a introdução de leguminosas forrageiras, correção da acidez do solo por meio da calagem, uso de ureia e outros métodos essenciais para a não degradação do solo.

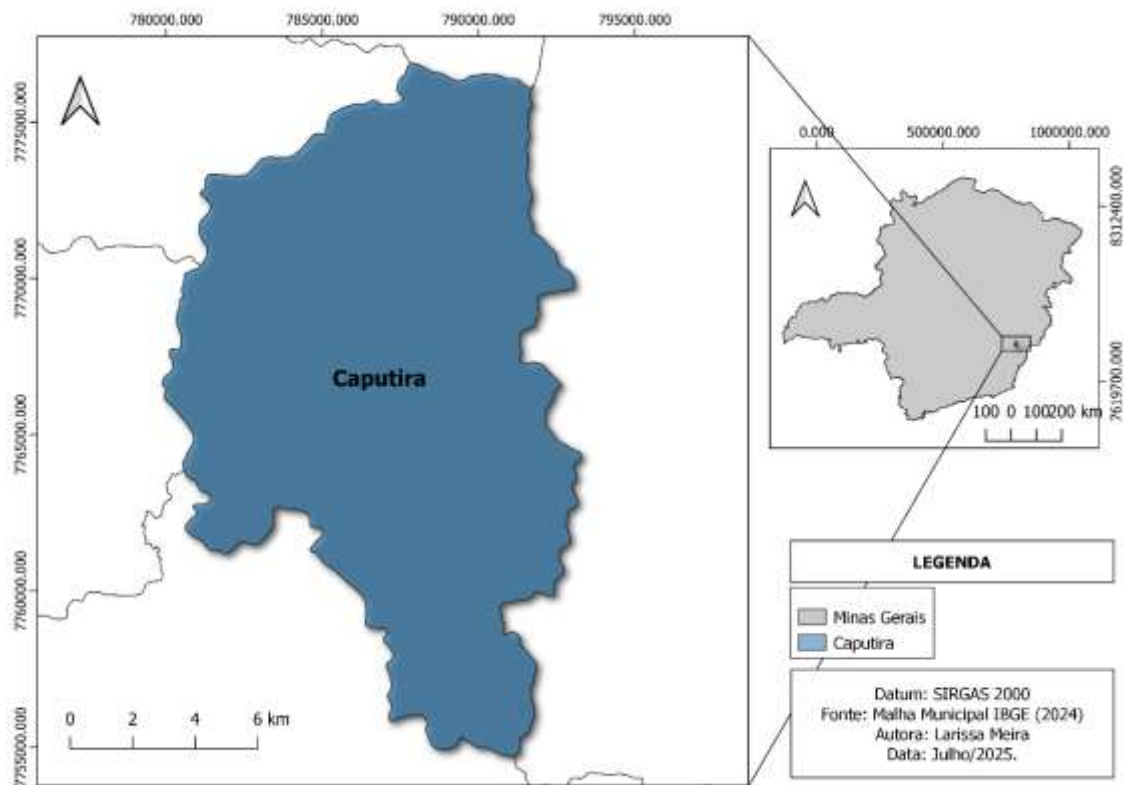
As práticas conservacionistas representam uma estratégia essencial para fortalecer a agricultura familiar de forma sustentável. Ao promover a conservação do solo, da água e da biodiversidade, essas ações garantem maior estabilidade produtiva, aumentam a resiliência dos sistemas agrícolas frente às mudanças climáticas e contribuem para a segurança alimentar das comunidades rurais. Além disso, possibilitam o uso mais eficiente dos recursos naturais, reduzindo custos com insumos e evitando a degradação ambiental. Portanto, a adoção de práticas conservacionistas não é apenas uma necessidade técnica, mas também uma ação estratégica para assegurar o futuro da agricultura familiar e dos ecossistemas onde ela está inserida.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização do município de Caputira – MG

A propriedade de agricultura familiar estudada está localizada no município de Caputira, em Minas Gerais (Figura 2). A cidade possui aproximadamente 8.936 habitantes e uma área territorial de 187,704 km² (IBGE, 2022). Em relação ao bioma e relevo, a região é predominantemente composta pelo bioma Mata Atlântica e o relevo do município é acidentado, marcado pela presença da Serra do Caparaó (Plano Municipal de Saneamento Básico de Caputira, 2014).

Figura 2 – Mapa de localização do município de Caputira - MG



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico de Caputira (2014) o clima do município é caracterizado como Tropical de Altitude, possuindo duas estações bem definidas: uma chuvosa no verão e outra seca durante o inverno e quanto as temperaturas no município, a média anual é cerca 14°C, a média máxima anual é de 18°C e a média mínima anual é de 10°C, e o índice pluviométrico anual é de aproximadamente 1.300 mm.

Já a hidrografia da cidade, ela pertence a bacia do rio Doce, abrangendo os estados de Espírito Santo (14%) e de Minas Gerais (86%), os principais córregos são o Pirapetinga e Crispim, eles possuem nascente no próprio município e deságuam no ribeirão da Cabeluda (Plano Municipal de Saneamento Básico de Caputira, 2014).

4.2 Caracterização da propriedade

A propriedade de agricultura familiar possui 1,06 módulo fiscal, equivalente a aproximadamente 25,4 ha (INCRA, 2024.). Na Figura 3 está a delimitação da propriedade.

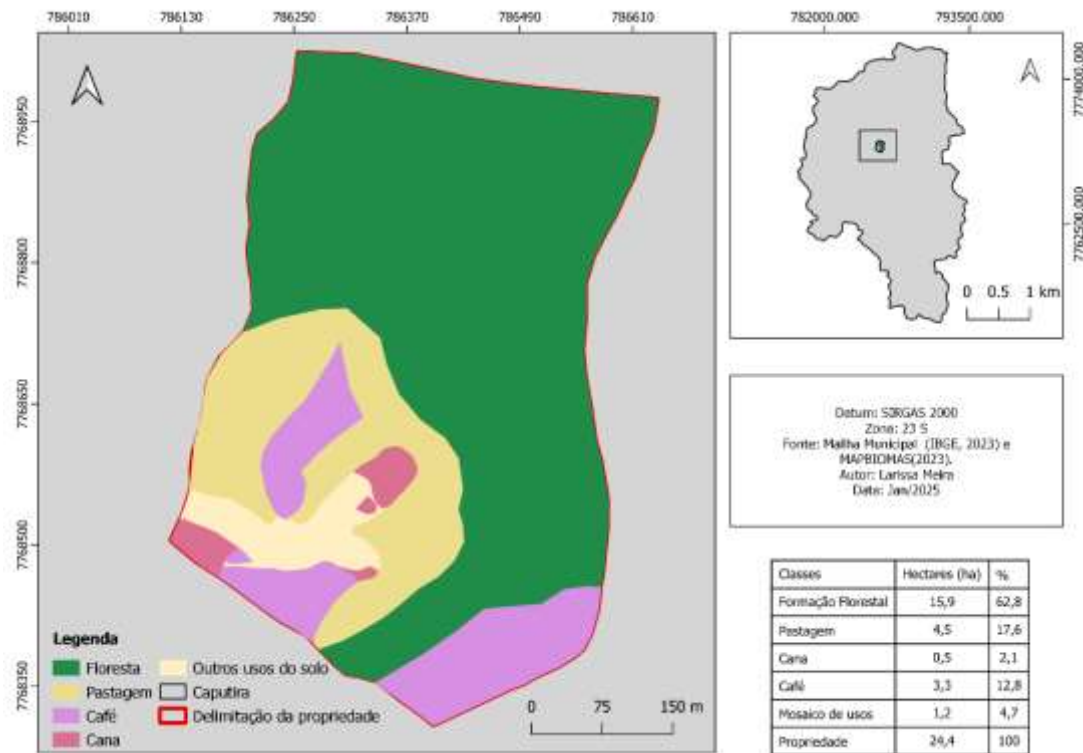
Figura 3 - Delimitação da propriedade



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Para a classificação do uso e cobertura da terra, foram utilizados os softwares QGIS e Google Earth. As delimitações da Figura 4 foram realizadas manualmente devido a área ser pequena, o que limita o nível de detalhe apresentado por algumas imagens de satélite, como as resoluções de 30 m e 10 m dos satélites Landsat e Sentinel-2, respectivamente. Para a definição das classes de uso do solo e as cores adotadas foram baseados nas legendas da coleção 9 do MapBiomas, plataforma que tem como objetivo apresentar dados do uso da terra de diferentes biomas.

Figura 4 - Mapa de uso e cobertura da terra da propriedade de agricultura familiar



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Conforme observado na Figura 4, a maior parte da área é ocupada por vegetação nativa, representando 62,8% do total. Em seguida, predominam as áreas de pastagem, que ocupam aproximadamente 17,6%, e as áreas de plantio de café, que abrangem cerca de 12,8% do terreno. Em menor proporção, encontram-se as áreas destinadas à cana-de-açúcar e capim elefante, com 2,1%, e o mosaico de usos, com 4,7%, que inclui áreas de terreiro, edificações e outras áreas não definidas pelo MapBiomias (2025). Além disso, o milho é cultivado anualmente em aproximadamente 0,5 hectare, entre as carreiras do plantio de café.

Em relação a produção agrícola na propriedade, destaca-se a produção de café como cultura permanente. Como culturas temporárias tem-se a produção de milho, cana-de-açúcar e capim-elefante, esses cultivos têm como objetivo complementar a alimentação do gado da propriedade, proporcionando uma dieta diversificada e equilibrada para os animais, visto que, apenas o manejo em pastagens não é o suficiente.

A pecuária no local é destacada pela criação de gado, com ênfase em vacas leiteiras. As vacas possuem a raça girolando, que são vacas mestiças provenientes do cruzamento de animais

de origem europeia, no caso o Holandês com vacas de raças zebuínas, o Gir (Miranda e Freitas, 2009). Na Tabela 2, são apresentadas a quantidade do rebanho.

Tabela 2– Rebanhos da propriedade

Rebanho	Número total de cabeças (un)
Bovinos <1 ano	4
Bovinos > 1 ano < 2 anos	4
Fêmeas > 2 anos	6
Vacas em período de lactação	9

Fonte: Elaborado pelo autora (2025).

A partir disso, é calculado no tópico 4.3 o cálculo das emissões no setor agropecuário, conforme as atividades realizadas na propriedade.

4.3 Cálculo das emissões

A metodologia utilizada para elaboração do inventário de emissões foi através do volume 4 “*2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use*” e o Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, do setor Agropecuário. Os capítulos utilizados para os cálculos das emissões no setor agropecuário foram adotados conforme as atividades existentes na propriedade e a sua relevância. Logo, foram considerados os subsetores Fermentação Entérica, Manejo de Dejetos e Solos Manejados e Aplicação de Calagem, e desconsiderados os subsetores de Cultivo de Arroz, Queima de Resíduos Agrícolas e Aplicação de Ureia, pois não se aplicam à realidade da propriedade. Portanto, definiu os seguintes capítulos do IPCC e dos inventários nacionais como referências para os cálculos de emissões:

Metodologias do IPCC:

- *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*; IPCC, 2019; V.4, C.10: *Emissions from Livestock and Manure Management* (IPCC, 2019b);
- *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*; IPCC, 2019; V.4, C.11: *N₂O Emissions from Managed Soils, and CO₂ Emissions from Lime and Urea Application* (IPCC, 2019c).

Metodologia do Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa:

- Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - Relatórios de Referência: Subsetor de Fermentação Entérica (Brasil, 2020a);
- Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - Relatórios de Referência: Subsetor de Manejo de Dejetos (Brasil, 2020e);
- Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - Relatórios de Referência: Subsetor de Solos Manejados, Calagem e Aplicação de Ureia (Brasil, 2020d).

Através do IPCC 2019 *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Agriculture, Forestry and Other Land Use*, Volume 4, foi possível definir as equações utilizadas para calcular as emissões da propriedade, elas estão descritas nos tópicos 4.3.1.1, 4.3.2.1, 4.3.2.2, 4.3.3.1 e 4.3.3.3. Para a obtenção dos parâmetros, foram adotados os dados da propriedade, referências da literatura, dados brasileiros definidos pelo Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Relatórios do setor Agropecuário, eles estão descritos nas seções 4.3.1.2, 4.3.2.3, 4.3.3.2 e 4.3.3.4. Nos casos em que não foi possível coletar parâmetros brasileiros foi considerado variáveis globais representados nos volumes 4 “2019 *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Agriculture, Forestry and Other Land Use*”. O fluxograma da Figura 5 resume a metodologia utilizada.

Figura 5- Fluxograma das fontes de emissões de GEE inventariadas



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A metodologia sugerida pelo IPCC (2019b) leva em consideração 3 tipos de *tiers* para a determinação dos cálculos das diferentes categorias emissoras de gases de efeito estufa. Cada

tier é definido conforme a disponibilidade dos dados, sendo o *Tier 1* representando informações mais básicas e gerais, quando não se tem uma base de informações tão precisas. O *Tier 2*, são dados mais precisos, sendo adotado parâmetros globais, nacionais e locais. O *Tier 3* é o nível mais elevado em relação à confiança dos dados, sendo considerado dados mais detalhados e específicos (IPCC, 2019b). Diante disso, e da falta de disponibilidade de dados que garantem a confiança dos cálculos para o *Tier 3*, foi adotado nos estudos apenas os *Tiers 1 e 2*.

Quanto aos gases inventariados, os principais são: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O). Esses gases são avaliados conforme cada categoria inventariada.

Para comparar as emissões de vários gases de efeito estufa, é adotado uma medida chamada de CO_2 equivalente, que se refere ao potencial de aquecimento de cada gás. Para o seu cálculo é multiplicado a quantidade de um gás pelo seu *Global Warming Potencial* (GWP), que mede a capacidade de cada gás de absorver calor na atmosfera em um determinado período, geralmente 100 anos (Assad *et al.*, 2019). Além disso, para essa parametrização o CO_2 é utilizado como referência. Na Tabela 3, é possível ver os valores de referência.

Tabela 3 – Global Warming Potencial dos principais GEE emitidos

Gás	GWP-100
CO_2	1
CH_4	25
N_2O	298

Fonte: Adaptado Assad *et.al.*, 2019.

4.3.1 Fermentação entérica

As emissões provenientes da fermentação entérica foram divididas em bovinos de corte e bovinos leite, tendo como o principal gás inventariado o gás metano (CH_4) (Brasil, 2020a). Os bovinos de corte foram subdivididos conforme idade, sexo e tipo de produção, sendo as seguintes subcategorias: menores que 1 ano, de 1 a 2 anos, fêmeas de corte > 2 anos (não confinadas).

Para os bovinos leiteiros, foi adotado o sistema de alta produção, devido à produção diária de leite ser entre 15-20 kg durante o período de 305 dias, que geralmente é o tempo de lactação das vacas (EMBRAPA, 2022). Isso totaliza cerca de 4.575 a 6.100 kg por cabeça/ano na

propriedade. Segundo o IPCC (2019b), os sistemas de alta produção de leite se baseiam em médias de produção de leite maiores que 3.400 kg por cabeça/ano.

As equações utilizadas para a fermentação entérica nas categorias de gado de corte e leite foram baseadas no *Tier 2* (Tabela 4), devido à disponibilidade de informações brasileiras necessárias para os cálculos. As equações estão descritas na seção 4.3.1.1, enquanto a obtenção dos parâmetros adotados é detalhada na seção 4.3.1.2. Os cálculos foram realizados através do *software* Excel.

Tabela 4 - Gases inventariados conforme as categorias dos setores de fermentação entérica

Subsetor	Categoria	Tier	Gás inventariado
Fermentação Entérica	Bovinos	2	CH ₄

Fonte: Adaptado (Brasil, 2020a)

4.3.1.1 Equações para emissão de fermentação entérica

- Emissão de metano (E_T):

$$E_T = \sum EF_{(T)} \cdot \left(\frac{N_{(T)}}{10^6} \right) \quad 1$$

Onde:

E_T = Emissões de metano provenientes da fermentação entérica em animais da categoria T, Gg CH₄ /ano;

$EF_{(T)}$ = Fator de emissão para a população pecuária definida T, kg CH₄/cabeça/ano;

$N_{(T)}$ = Número de cabeças de espécies pecuárias/categoria T, cabeças;

- Fator de emissão ($EF_{(T)}$)

$$EF_{(T)} = \frac{\left(\frac{Y_m}{100} \right) \cdot 365}{55.65} \quad 2$$

Onde:

$EF_{(T)}$ = Fator de emissão para a população pecuária definida T, kg CH₄/cabeça/ano;

Y_m = Fator de conversão de metano, porcentagem da energia bruta na alimentação convertida em metano.

- Ingestão de energia bruta (GE):

$$GE = \frac{\left(\frac{NE_m + NE_a + NE_l + NE_p}{REM}\right) + \left(\frac{NE_g}{REG}\right)}{DE} \quad 3$$

Onde:

GE = Energia bruta, MJ/dia;

NE_m = Energia líquida requerida pelo animal para manutenção, MJ/dia;

NE_a = Energia líquida para atividade animal, MJ/dia;

NE_l = Energia líquida para lactação, MJ/dia;

NE_p = Energia líquida necessária para a gravidez, MJ/dia;

REM = Relação entre energia líquida disponível em uma dieta para manutenção e energia digestível;

NE_g = Energia líquida necessária para o crescimento, MJ/dia;

REG = Razão entre a energia líquida disponível para o crescimento em uma dieta e a energia digestível consumida, adimensional;

DE = Digestibilidade do alimento expressa como uma fração da energia bruta, %.

A ingestão de energia bruta (GE), está relacionada ao consumo de ração que o animal necessita para adquirir energia para o seu crescimento, lactação e gravidez. Para realizar o seu cálculo, utiliza-se as equações de 4 a 10.

$$NE_m = Cf_i \cdot (Weight)^{0,75} \quad 4$$

Onde:

NE_m = Energia líquida requerida pelo animal para manutenção, MJ/dia;

Cf_i = Coeficiente que varia para cada categoria animal, MJ/dia/kg;

Weight = Peso vivo do animal, kg.

$$NE_a = C_a \cdot NE_m \quad 5$$

Onde:

NE_a = Energia líquida para atividade animal, MJ/dia;

NE_m = Energia líquida requerida pelo animal para manutenção, MJ/dia;

C_a = Coeficiente correspondente à situação alimentar do animal, adimensional.

$$NE_g = 22,02 \cdot \left(\frac{BW}{C \cdot MW} \right)^{0,75} \cdot WG^{1,097} \quad 6$$

Onde:

NE_g = Energia líquida necessária para o crescimento, MJ/dia;

BW = Peso vivo médio dos animais da população T, kg;

C = Coeficiente com valor de 0,8 para fêmeas, 1,0 para castrados e 1,2 para touros (NRC, 1996 apud IPCC, 2019a), adimensional;

MW = Peso corporal de um animal adulto individualmente, kg;

WG = Ganho de peso médio diário dos animais da população, kg/dia.

$$NE_l = \text{Milk} \cdot (1,47 + 0,40 \cdot \text{Fat}) \quad 7$$

Onde:

NE_l = Energia líquida para lactação, MJ/dia;

Milk = Quantidade de leite produzido, kg de leite/dia;

Fat = Teor de gordura do leite, %.

$$NE_p = C_{\text{pregnancy}} \cdot NE_m \quad 8$$

Onde:

NE_p = Energia líquida necessária para a gravidez, MJ/dia;

$C_{\text{pregnancy}}$ = Coeficiente de gravidez, adimensional.

$$\text{REM} = \left[1,123 - (4,092 \cdot 10^{-3} \cdot \text{DE}) + (1,126 \cdot 10^{-5} \cdot (\text{DE})^2) - \left(\frac{25,4}{\text{DE}} \right) \right] \quad 9$$

Onde:

REM = Relação entre energia líquida disponível na dieta para manutenção e energia digestível, adimensional;

DE = Digestibilidade do alimento expressa como uma fração da energia bruta, %.

$$\text{REG} = \left[1,164 - (5,16 \cdot 10^{-3} \cdot \text{DE}) + (1,308 \cdot 10^{-5} \cdot (\text{DE})^2) - \left(\frac{37,4}{\text{DE}} \right) \right] \quad 10$$

Onde:

REG = Relação entre a energia líquida disponível para o crescimento em uma dieta e a energia digestível consumida, adimensional;

DE = Digestibilidade do alimento expressa como uma fração da energia bruta, %.

4.3.1.2 Dados da atividade de fermentação entérica

Para determinar os parâmetros utilizados nos cálculos das equações de 1 a 10, foram adotados os valores presentes na Tabela 5.

Tabela 5- Resumo dos parâmetros de entrada para os cálculos de emissão de CH_4 devido a fermentação entérica

Parâmetro	Corte			Leite	Unidade	Fonte
	Bovinos <1 ano	Bovinos > 1 ano < 2 anos	Fêmeas > 2 anos	Alta produção		
Peso animal vivo (BW)	163	293	321	508	kg	Brasil (2020a)
Peso animal maduro (MW)	330	330	330	N/A	kg	Brasil (2020a)

Taxa de digestibilidade (DE)	59,8	59,8	59,8	68,4	%	Brasil (2020a)
Ganho de peso/dia (WG)	0,3	0,3	N/A	N/A	kg/dia	Brasil (2020a)
Produção de leite (milk)	N/A	N/A	7	17	kg/dia	Propriedade
Teor de gordura no leite (fat)	N/A	N/A	4,9	3,67	%	Brasil (2020a)
Taxa de prenhez (Cpregnancy)	N/A	N/A	10	10	%	IPCC (2019b)
Percentual de fêmeas que ficam prenhas	N/A	N/A	65	60	%	MCTI (2015) apud Brasil (2020a)
Coefficiente para NEg (C)	0,8	0,8	0,8	0,8	-	NRC, 1996 apud IPCC (2019b)
Coefficiente para Nem (Cf)	0,322	0,322	0,322	0,386	MJ/dia/kg	IPCC (2019b)
Coefficiente para NEa (Ca)	0,17	0,17	0,17	0,17	-	IPCC (2019b)
Taxa de conversão de metano (Ym)	0,065	0,07	0,07	0,063	-	IPCC (2019b)

N/A – Não se aplica; “-” – Valores adimensionais

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.3.2 Manejo de dejetos

As emissões do manejo de dejetos inventariadas são provenientes das emissões do gás metano (CH_4) e das emissões diretas e indiretas de óxido nitroso (N_2O) (Brasil, 2020e). As categorias e subcategorias adotadas foram as mesmas apresentadas na seção 4.3.1, de fermentação entérica. Quanto o sistema de manejo de dejetos, na propriedade se dá de duas formas: pastagem e armazenamento sólido, no primeiro caso o esterco é mantido na própria pastagem não manejada e no caso do sistema de armazenamento sólido o esterco permanece em pilhas amontoadas em área específica, geralmente em volta do curral (IPCC, 2019b).

A metodologia de cálculo utilizada para o manejo de dejetos foram baseadas no *Tier 1* e 2, conforme a Tabela 6. As equações para a emissão de CH₄ e emissões diretas e indiretas N₂O estão descritas nos tópicos 4.3.2.1 e 4.3.2.2, respectivamente. Enquanto a obtenção dos parâmetros adotados é detalhada na seções 4.3.2.3 Os cálculos foram realizados através do *software* Excel.

Tabela 6 - Gases inventariados conforme as categorias dos setores de manejo de dejetos

Subsetor	Categoria	Tier	Gás inventariado
Manejo de dejetos - Emissões diretas	Bovinos	2	CH ₄ eN ₂ O
Manejo de dejetos - Emissões indiretas	Bovinos	1	N ₂ O

Fonte: Adaptado (Brasil, 2020e).

4.3.2.1 Equações das emissões de CH₄ por meio manejo de dejetos

As emissões de CH₄ são determinadas pela equação 11. O fator de emissão (EF) é definido pela equação 12.

Emissão de CH₄

$$CH_4 = \sum \frac{(N \cdot EF)}{10^{-6}} \quad 11$$

Onde:

CH₄ = Emissão de CH₄ provenientes da gestão de estrume, kg CH₄/ano;

EF = Fator de emissão para a população de animais definida, conforme a categoria T, kg CH₄/cabeça/ano;

N = Número de cabeças existentes, cabeças.

- Fator de emissão para manejo de dejetos (EF_(T))

$$EF_{(T)} = (VS_T \cdot 365) \cdot [B_{0(T)} \cdot 0,67 \cdot \sum \frac{MCF_{S,k}}{100}] \cdot AWMS_{(T,S,k)} \quad 12$$

Onde:

$EF_{(T)}$ = Fator de emissão para a população de animais definida, conforme a categoria T, kg CH_4 / cabeça/ano;

VS_T = Sólido volátil excretado para animais da categoria T, kg/MS/animal/dia;

365 = Base para calcular produção anual de VS, dia/ano;

$B_{0(T)}$ = Capacidade máxima de produção de metano para esterco produzido pela categoria T, $m^3/CH_4/kg$ de VS excretada;

0,67 = Fator de conversão de $m^3 CH_4$ para kg de CH_4 ;

$MCF_{S,k}$ = Fatores de conversão de metano para cada sistema de manejo de esterco (S) por região climática (k), %;

$AWMS_{(T,S,k)}$ = Fração de esterco pecuário de animais (T) conforme o sistema de gerenciamento de dejetos (S) e região climática (k), adimensional.

- Sólidos voláteis específicos do país (VS)

$$VS = [GE \cdot (1 - \frac{DE}{100}) + (UE \cdot GE)] \cdot \frac{1-ASH}{18,45} \quad 13$$

Onde:

GE = Energia bruta, MJ/dia;

DE = Digestibilidade do alimento expressa como uma fração da energia bruta, %;

VS = Excreção de sólidos voláteis por dia com base na matéria orgânica seca, kg SV/dia;

UE.GE = Energia urinária expressa como fração GE, adimensional;

ASH = Teor de cinzas da ração calculado como uma fração do consumo de matéria seca;

18,45 = Fator de conversão de GE da dieta por kg MS, MJ/kg.

4.3.2.2 Equações das emissões diretas e indiretas de N₂O por meio manejo de Dejetos

- Emissões diretas de N₂O:

As emissões diretas são definidas através da equação 14, onde ela é desagregada pela equação 15.

$$N_2O_{D(mm)} = \left[\sum_S \left[\sum_{T,P} \left((N_{(T,P)} \cdot Nex_{(T,P)}) \cdot AWMS_{(T,S,P)} \right) + N_{cdg(s)} \right] \cdot EF_{3(S)} \right] \cdot \frac{44}{28} \quad 14$$

Onde:

$N_2O_{D(mm)}$ = Emissões diretas de N₂O provenientes da gestão de estrume, kgN₂O/ano

$N_{(T,P)}$ = Número de cabeças;

$Nex_{(T,P)}$ = Excreção média anual de N por cabeça de espécie/categoria no país, para sistema de produtividade, kg/animal/ano;

$N_{cdg(s)}$ = Aporte anual de nitrogênio via co-digerido no país, kg N/ano;

$AWMS$: Fração de esterco pecuário conforme o sistema de gerenciamento de dejetos e região climática, adimensional.

$EF_{3(S)}$ = Fator de emissão para emissões diretas de N₂O do Sistema de gestão de dejetos no país (kg N₂O -N/kg N)

S = Sistema de gestão de estrume;

T = Espécie/categoria de gado;

P = Classe de produtividade, alta ou baixa, a ser considerada.

$\frac{44}{28}$ = Conversão de emissões de N₂O—N_(mm) em emissões de N₂O_(mm)

- Excreção média anual de N ($Nex_{(T,P)}$)

$$Nex_{(T,P)} = N_{rate(T,P)} \cdot \frac{TAM_{(T,P)}}{1000} \cdot 365$$

Onde:

$N_{ex(T)}$ = Excreção anual de N para animais da categoria T (kg N/animal/ano);

$N_{rate(T)}$ = Excreção padrão de N, kg N/1000 kg de massa animal/dia para animais de categoria T;

$TAM_{(T,P)}$ = Massa animal típica para animais da categoria T (kg/animal) .

- Emissões indiretas de N_2O

As equações 16 e 17 são utilizadas para estimar as emissões indiretas de óxido nitroso (N_2O), contemplando a volatilização de nitrogênio (N) sob as formas de amônio NH_3 e óxidos de nitrogênio NO_x , além das perdas relacionadas à volatilização provenientes da gestão de estrume.

- Emissões indiretas de N_2O pela deposição do N volatilizado do manejo de dejetos

$$N_2O_{G(mm)} = (N_{volatilization-MMS} \cdot EF_4) \cdot \frac{44}{28} \quad 16$$

Onde:

$N_2O_{G(mm)}$ = Emissões indiretas de N_2O devido à volatilização de N proveniente do manejo de dejetos, kg N_2O /ano;

$N_{volatilization-MMS}$ = Quantidade de nitrogênio do esterco que é perdida devido à volatilização de NH_3 e NO_x , kg N/ano;

EF_4 = Fator de emissão para emissões de N_2O provenientes da deposição atmosférica de nitrogênio em solos e superfícies de água, kg $N_2O - N / (kg NH_3 - N + NO_x - N_{volatilizado})$.

- Número de perdas devido à volatilização de gestão de estrume ($N_{volatilization-MMS}$)

$$\begin{aligned}
& N_{\text{volatilization-MMS}} \\
& = \left[\sum_S \left[\sum_{T,P} \left((N_{(T,P)} \cdot Nex_{(T,P)}) \cdot AWMS_{(T,S,P)} \right) \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + N_{\text{cdg}(S)} \right] \cdot \text{Frac}_{\text{GasMS}(T,S)} \right]
\end{aligned}
\tag{17}$$

Onde:

$N_{\text{volatilization-MMS}}$ = Quantidade de nitrogênio do esterco que é perdida devido à volatilização de NH_3 e NO_x , kg N/ano;

$N_{(T,P)}$ = Número de cabeças;

$Nex_{(T)}$ = Excreção anual de N para animais da categoria T (kg N/animal/ano);

$N_{\text{cdg}(S)}$ = Aporte anual de nitrogênio via codigerido no país (kg N/ano);

$\text{Frac}_{\text{GasMS}(T,S)}$ = razão de azoto do estrume gerido para animais de categoria T que se volatiliza como NH_3 e NO_x no sistema de manejo de dejetos S.

S = Sistema de gestão de estrume;

T = Espécie/categoria de gado;

P = Classe de produtividade, alta ou baixa, a ser considerada.

4.3.2.3 Dados da atividade para o cálculo das emissões de CH_4 e N_2O por meio de manejo de dejetos

Para a determinação dos parâmetros adotados nas equações de 11 a 13 das emissões provindas do gás metano, foram adotados os valores presentes na Tabela 7.

Tabela 7 - Resumo dos parâmetros de entrada para os cálculos de emissão de CH₄ devido o manejo de dejetos

Parâmetro	Corte			Leite	Unidade	Fonte
	Bovinos <1 ano	Bovinos > 1 ano < 2 anos	Fêmeas > 2 anos	Alta produção		
Ingestão de Energia Bruta (GE)	82,93	128,75	186,33	285,46	MJ/kg	Calculado na equação 3
Taxa de digestibilidade (DE)	59,8	59,8	59,8	68,4	%	Brasil (2020a)
Capacidade máxima de produção de metano (B0)	0,13	0,13	0,13	0,24	kg CH ₄ /VS	IPCC (2019b).
Fator de conversão de metano (MCF) – Armazenamento sólido	5	5	5	5	%	IPCC (2019b).
Fator de conversão de metano (MCF) - Pastagem	0,47	0,47	0,47	0,47	%	IPCC (2019b)
Fração de utilização de cada sistema de manejo de dejetos animal (MS) – Armazenamento Sólido	100	100	100	86,38	%	Brasil (2020e)
Fração de utilização de cada sistema de manejo de dejetos animal (MS) - Pastagem	0	0	0	0,1362	%	Brasil (2020e)

Energia urinária expressa como fração de GE (UE x GE)	0,4	0,4	0,4	0,4	MJ dia-1	IPCC (2019b)
Teor de cinzas contido no dejetos (ASH)	8	8	8	8	%	IPCC (2019b)
Número de cabeças (N)	4	4	6	9	Cabeça	Propriedade

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Para a determinação dos valores, foram considerados, além da categoria de bovinos adotada e do sistema de manejo, os parâmetros relacionados à zona climática da área estudada. No caso da cidade de Caputira, classificou-se o clima como úmido, conforme definição do IPCC (2019e), que caracteriza essas regiões como aquelas com precipitação anual superior a 1000 mm.

Quanto os parâmetros das equações de 14 a 17 das emissões provindas de forma direta e indireta de N_2O , foram adotados os valores presentes na Tabela 8.

Tabela 8 - Resumo dos parâmetros de entrada para os cálculos de emissão de N_2O devido o manejo de dejetos

Parâmetro	Corte			Leite	Unidade	Fonte
	Bovinos <1 ano	Bovinos > 1 ano < 2 anos	Fêmeas > 2 anos	Alta produção		
Excreção padrão de N para animais de categoria T (N_{rate})	0,36	0,36	0,36	0,6	kg N/1000 kg de massa animal/dia	IPCC (2019b)
Massa animal típica para animais da categoria T (TAM)	163	293	314	519	kg/cabeça animal	Brasil (2020a)
Fração de esterco pecuário conforme o sistema de gerenciamento de dejetos e região climática (AWMS)	100	100	100	86,36	%	Brasil (2020e)

Aporte anual de nitrogênio via codigerido no país (N_{cdg})	N/A	N/A	N/A	N/A	Adimensional	N/A
Fator de emissão para emissões diretas de N_2O (EF_3)	0,01	0,01	0,01	0,01	kg N_2O-N/kg N	IPCC (2019b)
Fração de azoto do estrume gerido para animais de categoria T que se volatiliza como NH_3 e NO_x no sistema de manejo de dejetos ($Frac_{GasMS}$)	0,45	0,45	0,45	0,3	Adimensional	IPCC (2019b)
Fator de emissão para emissões de NO_2 provenientes da deposição atmosférica de nitrogênio em solos e superfícies de água (EF_4)	0,014	0,014	0,014	0,014	kg $NH_3 - N + NO_x - N_{volatilizado}$	IPCC (2019b)

N/A – Não se aplica

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O fator de aporte anual de nitrogênio via codigerido no país (N_{cdg}), foi considerado como não se aplica, pois ele é usado em casos de digestão anaeróbica.

4.3.3 Solos manejados e aplicação de calagem

O manejo do solo na propriedade foi avaliado com base em quatro principais práticas: a deposição de dejetos animais diretamente nas pastagens; a aplicação de fertilizantes sintéticos na lavoura de café, realizada aproximadamente duas vezes ao ano com o uso de NPK 25-05-20; aproveitamento de resíduos agrícolas, compostos por folhas, hastes e palha provenientes dos cultivos locais, como o milho plantado entre as carreiras de café e as áreas destinadas à cana-de-açúcar e capim-elefante; e adubos orgânicos provenientes do esterco bovino. Quanto a aplicação de calagem ela é realizada na área de pastagem, aplicada no máximo uma vez ao ano.

Os gases inventariados foram o N_2O e CO_2 . As emissões de N_2O foram divididas em emissões diretas, aquelas na qual o N é adicionada/liberado diretamente no solo e as emissões indiretas, que são associadas a deposição atmosférica do N volatilizado na forma de NH_3 e NO_x ($N_2O_{(ATD)} - N$) (IPCC, 2019c). Enquanto as emissões de CO_2 foram calculadas a partir da aplicação de calagem.

As equações adotadas para as emissões diretas e indiretas de N_2O estão descritas na seção 4.3.3.1 e os parâmetros adotados na seção 4.3.3.2. E para as emissões de CO_2 as formulas estão descritas na seção 4.3.3.3 e os parâmetros na seção 4.3.3.4. Quanto aos *tiers* adotados foram o *tier* 1 e 2, conforme descrito na Tabela 9.

Tabela 9 - Gases inventariados conforme as categorias/subcategoria dos setores de solos manejados e aplicação de calagem

Subsetor	Categoria	Subcategoria	Tier	Gás Inventariado
Solo Manejado – Emissões diretas	Fertilizantes Sintéticos	Ureia	2	N_2O
	Adubos Orgânicos	Estercos	1 e 2	N_2O
	Deposição de Dejetos	Bovinos	2	N_2O
	Resíduos Agrícolas	Cana-de-Açúcar	2	N_2O
		Capim Elefante	2	N_2O
		Milho	2	N_2O
		Pastagem	2	N_2O
	Mineralização de N Associada a Perda de C do Solo	N/A	2	N_2O
Solos manejados – Emissões indiretas	Manejo de Solos Orgânicos	N/A	2	N_2O
	Deposição Atmosférica	Fertilizantes Sintéticos	2	N_2O
		Adubos Orgânicos	1 e 2	N_2O
		Deposição de Dejetos	1 e 2	N_2O
		Resíduos Agrícolas	1 e 2	N_2O
	Lixiviação/Escorrimento Superficial	Fertilizantes sintéticos	2	N_2O
		Adubos Orgânicos	1 e 2	N_2O
		Deposição de Dejetos	1 e 2	N_2O
		Resíduos Agrícolas	1 e 2	N_2O

		Mineralização de N Associada a Perda de C do Solo	2	N ₂ O
		Manejo de Solos Orgânicos	2	N ₂ O
Calagem	N/A	N/A	1	CO ₂

N/A – Não se aplica

Fonte: Adaptado Brasil (2025d).

Embora o inventário nacional contemple diversas categorias emissoras, foram consideradas apenas aquelas aplicáveis à propriedade. No caso do capim-elefante, não foram encontradas informações específicas sobre seus parâmetros no IPCC nem no inventário nacional. Assim, devido às semelhanças com a cana-de-açúcar, especialmente quanto ao alto potencial de produção de biomassa, adotaram-se os mesmos fatores utilizados para a cana-de-açúcar (Lopes, Aroeira, 2022).

4.3.3.1 Equações das emissões diretas e indiretas de solos manejados

A emissão direta N₂O é calculada através da equação 18, ela desagregada nas equações 19 e 20. Enquanto as emissões indiretas são por meio das equações 32 e 33.

- Emissões diretas de N₂O:

$$N_2O_{\text{Direct}} - N = N_2O - N_{\text{Ninputs}} + N_2O - N_{\text{OS}} + N_2O - N_{\text{PRP}} \quad 18$$

Onde:

$N_2O_{\text{Direct}} - N$ = Emissões anuais diretas produzidas por solos manejados, kg N₂O –N/ano;

$N_2O - N_{\text{Ninputs}}$ = Emissões anuais diretas provenientes de entradas de N em solos manejados, kg N₂O –N /ano;

$N_2O - N_{\text{OS}}$ = Emissões anuais diretas de solos orgânicos manejados, kg N₂O –N /ano;

$N_2O - N_{\text{PRP}}$ = Emissões anuais diretas provenientes de urina e esterco introduzidos em solos pastados, kgN₂O –N /ano.

$$N_2O - N_{\text{Ninputs}} = [(F_{\text{SN}} + F_{\text{ON}} + F_{\text{CR}} + F_{\text{SOM}}).EF_1] + \quad 19$$

$$[(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR} + F_{SOM})_{FR} \cdot EF_{1FR}]$$

Onde:

$N_2O - N_{Ninputs}$ = Emissões anuais diretas provenientes de entradas de N em solos manejados, kg $N_2O - N$ /ano;

F_{SN} = Fertilizantes sintéticos aplicados aos solos, kg N /ano;

F_{ON} = Adubos orgânicos utilizados como fertilizantes no solo, kg N /ano;

F_{CR} = Entrada de N no solo por resíduos de lavouras e na renovação de pastagens no solo, kg N /ano;

F_{SOM} = Entrada de N no solo pela mineralização resultante da perda de C do solo pelo manejo e mudança de uso de solos minerais, kg N /ano;

EF_1 = Fator de emissão para emissões de N_2O a partir de entradas de N, kg $N_2O - N$ / (kg N input);

EF_{1FR} = Fator de emissão para emissões de N_2O a partir das entradas de N para arroz inundado, kg $N_2O - N$ / (kg N input).

Observação: As variáveis F_{ON} , F_{CR} e F_{PRP} são calculadas pelas equações 22, 26 e 31.

$$N_2O - N_{PRP} = (F_{PRP,CPP} \cdot EF_{3PRP,CPP}) + (F_{PRP,SO} \cdot EF_{3PRP,SO}) \quad 20$$

Onde:

$N_2O - N_{PRP}$ = Emissões anuais diretas provenientes de urina e esterco introduzidos em solos pastados, kg $N_2O - N$ /ano.

F_{PRP} = Deposição de urina e fezes de animais no solo, kg N /ano;

EF_{3PRP} = Fator de emissão para emissões de N_2O da urina e do esterco N depositado em pastagens, camose piquetes por animais em pastejo, kg $N_2O - N$ / (kg N input);

CPP = Gado, aves e porcos;

SO = Outros animais.

A conversão de emissões de $N_2O - N$ para emissões de N_2O para fins de relatórios é realizada usando a seguinte equação:

$$N_2O = N_2O - N * 44/28 \quad 21$$

- **Adubos orgânicos utilizados como fertilizantes no solo (F_{ON}):**

$$F_{ON} = N_{MMSavb} \quad 22$$

Onde:

F_{ON} = Adubos orgânicos utilizados como fertilizantes, kg N/ano;

N_{MMSavb} = Quantidade de N de esterco administrado disponível para aplicação no solo e alimentação, kg N /ano;.

Para calcular N_{MMSavb} , tem-se a equação 23.

$$N_{MMSavb} = \sum_S \sum_T N_{(T)} \cdot Nex_{(T)} \cdot AWMS_{(T,S)} + N_{(cdg)} \cdot (1 - Frac_{LossMS(T,S)})] \\ + N_{(T)} \cdot AWMS_{(T,S)} \cdot N_{beldding MS(T,S)}] \quad 23$$

Onde:

N_{MMSavb} = Quantidade de N de esterco administrado disponível para aplicação no solo e alimentação, kg N /ano;

N_{MMSavb} = Quantidade de nitrogênio do esterco manejado disponível para aplicação em solos manejados ou para alimentação, combustível ou fins de construção, kg N /ano;

$N_{(T)}$ = Número de cabeças de espécie/categoria T no país;

$Nex_{(T)}$ = Média anual de excreção de N por animal da espécie/categoria T no país, kg N /animal/ano;

$AWMS_{(T,S)}$ = Fração da excreção anual total de nitrogênio para cada espécie pecuária/categoria T que é gerenciado no sistema de gerenciamento de esterco S no país, adimensional;

$N_{(cdg)}$ = Quantidade de nitrogênio de co-digeridos adicionados às plantas de biogás, como resíduos de alimentos ou culturas cultivadas especificamente, kg N /ano;

$\text{Frac}_{\text{Loss}_{\text{MS}}(\text{T},\text{S})}$ = Fração total de azoto do estrume gerido para a categoria pecuária T que se perde no sistema de gestão S de perda de estrume, adimensional;

$\text{N}_{\text{beddingMS}}(\text{T},\text{S})$ = Quantidade de nitrogênio da cama, kg N /animal/ano.

$\text{Frac}_{\text{Loss}_{\text{MS}}(\text{T},\text{S})}$ é determinado pela equação 24.

$$\text{Frac}_{\text{Loss}_{\text{MS}}(\text{T},\text{S})} = \text{Frac}_{\text{GAS}_{\text{MS}}(\text{T},\text{S})} + \text{Frac}_{\text{LEACHS}_{\text{MS}}(\text{T},\text{S})} + \text{Frac}_{\text{N}_2\text{MS}(\text{S})} + \text{EF}_{3(\text{s})} \quad 24$$

Onde:

$\text{Frac}_{\text{Loss}_{\text{MS}}(\text{T},\text{S})}$ = Fração total de azoto do estrume gerido para animais da categoria T que se perde no sistema de gerenciamento de esterco S, adimensional;

$\text{Frac}_{\text{GAS}_{\text{MS}}(\text{T},\text{S})}$ = Fração de azoto do estrume gerido para animais da categoria T que é perdida por volatilização no sistema de gestão de estrume S como NH_3 ou NO_x , adimensional;

$\text{Frac}_{\text{LEACHS}_{\text{MS}}(\text{T},\text{S})}$ = Fração de azoto do estrume gerido para animais da categoria T que se perde no sistema de gestão de estrume S por lixiviação ou escoamento, adimensional;

$\text{Frac}_{\text{N}_2\text{MS}(\text{S})}$ = Fração de azoto do estrume gerido que se perde no sistema de gestão do estrume S como N_2 , adimensional;

$\text{EF}_{3(\text{s})}$ = Fator de emissão para emissões diretas de N_2O provenientes do sistema de gestão de dejetos S, Kg N_2O -N /(kg nitrogênio excretado).

$\text{Frac}_{\text{N}_2\text{MS}(\text{S})}$ é calculado pela equação 25

$$\text{Frac}_{\text{N}_2\text{MS}(\text{S})} = \text{R}_{\text{N}_2(\text{N}_2\text{O})} \cdot \text{EF}_{3(\text{S})} \quad 25$$

Onde:

$\text{Frac}_{\text{N}_2\text{MS}(\text{S})}$ = Fração de azoto do estrume gerido que se perde no sistema de gestão do estrume S como N_2 , adimensional;

$R_{\text{N}_2(\text{N}_2\text{O})}$ = Razão de emissões de N_2 : N_2O , adimensional;

$\text{EF}_{3(\text{s})}$ = Fator de emissão para emissões diretas de N_2O provenientes do sistema de gestão de dejetos S, Kg $\text{N}_2\text{O-N}$ / (kg nitrogênio excretado).

- **Entrada de N no solo por resíduos de lavouras e na renovação de pastagens (F_{CR})**

O cálculo de F_{CR} se dá através da equação 26:

$$F_{\text{CR}} = \sum_T \{ [\text{AGR}_{(\text{T})} \cdot \text{N}_{\text{AG}(\text{T})} \cdot (1 - \text{Frac}_{\text{Remove}(\text{T})} - (\text{Frac}_{\text{Burnt}(\text{T})} \cdot C_f))] + [\text{BGR}_{(\text{T})} \cdot \text{N}_{\text{BG}(\text{T})}] \} \quad 26$$

Onde:

F_{CR} = Entrada de N no solo por resíduos de lavouras e na renovação de pastagens no solo (kg N /ano);

$\text{AGR}_{(\text{T})}$ = Quantidade total anual de resíduos de culturas acima do solo para a cultura T, kg dm /ano;

$\text{N}_{\text{AG}(\text{T})}$ = Teor de N dos resíduos acima do solo para a cultura T, kg N / (kg dm);

$\text{Frac}_{\text{Remove}(\text{T})}$ = Fração de resíduos acima do solo da cultura T removidos anualmente para fins de alimentação, adimensional;

$\text{Frac}_{\text{Burnt}(\text{T})}$ = fração da área anual colhida da cultura T queimada (adimensional);

C_f = Fator de combustão, adimensional;

$\text{BGR}_{(\text{T})}$ = Quantidade total anual de resíduos de culturas subterrâneas para a cultura T, kg dm /ano.

$\text{N}_{\text{BG}(\text{T})}$ = Teor de N dos resíduos subterrâneos para cultura T, kg N/(kg.dm)

Para determinar os parâmetros, de $\text{AGR}_{(\text{T})}$ e $\text{BGR}_{(\text{T})}$ tem-se as equações 27 e 28.

$$AGR_{(T)} = AG_{DM(T)} \cdot Area_{(T)} \quad 27$$

$$BGR_{(T)} = (Crop_{(T)} + AG_{DM(T)}) \cdot RS_{(T)} \cdot Area_{(T)} \cdot Frac_{Renew(T)} \quad 28$$

Onde:

$AGR_{(T)}$ = Quantidade total anual de resíduos de culturas acima do solo para a cultura T, kg d.m. / ano

$BGR_{(T)}$ = quantidade total anual de resíduos de culturas subterrâneas para a cultura T, kg d.m. / ano

$AG_{DM(T)}$ = Matéria seca residual acima do solo para a cultura T, k.dm/ha;

$\acute{A}rea_{(T)}$ = Área total anual colhida da cultura T, ha/ano;

$Crop_{(T)}$ = Produção anual de matéria seca colhida para a cultura T, kg.dm/ha;

$AG_{DM(T)}$ = Matéria seca residual acima do solo para a cultura T, kg.dm/ha;

$RS_{(T)}$ = Razão + de biomassa da raiz abaixo do solo para biomassa da parte aérea acima do solo para a cultura T, kg.dm/ha.(kg.dm /ha);

$Frac_{Renew(T)}$ = Fração da área total sob a cultura T que é renovada anualmente, adimensional.

Para determinar $Crop_{(T)}$ tem-se as equações 29.

$$Crop_{(T)} = YieldFresh_{(T)} \cdot DRY \quad 29$$

Onde:

$Crop_{(T)}$ = Produção anual de matéria seca colhida para a cultura T, kg dm/ha;

$YieldFresh_{(T)}$ = produção fresca colhida para a cultura T, kg de peso fresco /ha;

DRY = fração de matéria seca da cultura colhida T, kg dm / (kg peso fresco).

$YieldFresh_{(T)}$, pode ser calculado através da produtividade divida pela área colhida, através da equação 30:

$$\text{YieldFresh}_{(T)} = (P \cdot 1000) / \text{Área}_{(T)} \quad 30$$

Onde:

$\text{YieldFresh}_{(T)}$ = produção fresca colhida para a cultura T, kg de peso fresco/ha;

P= Produtividade anual da cultura, t;

$\text{Área}_{(T)}$ = Área de produção para a cultura T, há.

- **Urina e esterco de animais em pasto (F_{PRP}):**

Para o cálculo de F_{PRP} é considerado a equação 31.

$$F_{\text{PRP}} = \sum_T [(N_{(T)} \cdot N_{\text{ex}(T)}) \cdot MS_{(T, \text{PRP})}] \quad 31$$

Onde:

F_{PRP} = Quantidade anual de urina e N de esterco depositado em pastagens, campos, piquetes por animais em pastoreio, kg N /ano;

$N_{(T)}$ = Número de cabeças de gado da categoria T no país;

$N_{\text{ex}(T)}$ = Excreção média anual de N por espécie/categoria T no país, kg N /animal /ano;

$MS_{(T, \text{PRP})}$ = Fração da excreção anual total de N para cada categoria de gado T que é depositada em pastagens.

- **Emissões indiretas de N_2O por deposição atmosférica**

Já as emissões indiretas são definidas pelas equações 32 e 33.

- Emissões por deposição atmosférica:

$$\text{N}_2\text{O}_{(\text{ATD})} - \text{N} = \left\{ \sum_i (F_{\text{SNI}} \cdot \text{Frac}_{\text{GASFi}}) + [(F_{\text{ON}} + F_{\text{PRP}}) \cdot \text{Frac}_{\text{GASM}}] \right\} \cdot \text{EF}_4 \quad 32$$

Onde:

$\text{N}_2\text{O}_{(\text{ATD})} - \text{N}$ = Quantidade anual de $\text{N}_2\text{O} - \text{N}$ produzida pela deposição atmosférica de N volatilizado de solos manejados, kg $\text{N}_2\text{O} - \text{N}$ /ano;

F_{SNi} = Quantidade anual de fertilizante sintético N aplicado aos solos sob diferentes condições i, kg N /ano;

$\text{Frac}_{\text{GASF}_i}$ = Fração do fertilizante sintético N que se volatiliza como NH_3 e NO_x sob diferentes condições i, kg N volatilizado / kg de N aplicado

F_{ON} = Quantidade anual de esterco animal administrado, composto, lodo de esgoto e outras adições orgânicas de N aplicadas aos solos, kg N /ano;

F_{PRP} = Quantidade anual de urina e N de esterco depositado por animais em pastagem e piquete, kg N /ano;

$\text{Frac}_{\text{GASM}}$ = Fração de materiais fertilizantes orgânicos nitrogenados aplicados (F_{ON}) e de N depositado na urina e no esterco por animais em pastejo (F_{PRP}) que se volatiliza como NH_3 e NO_x , kg de N volatilizado / kg de N aplicado ou depositado;

EF_4 = Fator de emissão para emissões de N_2O da deposição atmosférica de N em solos e superfícies de água, kg $\text{N}-\text{N}_2\text{O}$ / (kg NH_3-N + NO_x-N volatilizado).

- Emissões indiretas por meio de N lixiviado:

$$\text{N}_2\text{O}_{(\text{L})} - \text{N} = (F_{\text{SN}} + F_{\text{ON}} + F_{\text{PRP}} + F_{\text{CR}} + F_{\text{SOM}}) \cdot \text{Frac}_{\text{LEACH}-(\text{H})} \cdot \text{EF}_5 \quad 33$$

Onde:

$\text{N}_2\text{O}_{(\text{L})} - \text{N}$ = Quantidade anual de $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ produzida pela lixiviação e escoamento de adições de N para áreas gerenciadas em regiões onde ocorre lixiviação/escoamento, kg $\text{N}_2\text{O} - \text{N}$ /ano;

F_{SN} = Quantidade anual de fertilizante sintético N aplicado aos solos em regiões onde ocorre lixiviação/escoamento, kg N/ano;

F_{ON} = Quantidade anual de esterco animal administrado, composto, lodo de esgoto e outras adições orgânicas de N aplicadas aos solos em regiões onde ocorre lixiviação/escoamento, kg N/ano;

F_{PRP} = Quantidade anual de urina e N de esterco depositado por animais em pastejo em regiões onde ocorre lixiviação/ escoamento, kg N/ano;

F_{CR} = Quantidade de N em resíduos de culturas (acima e abaixo do solo), incluindo culturas fixadoras de N, e da renovação de forragem/pastagem, devolvidos aos solos anualmente em regiões onde ocorre lixiviação/ escoamento, kg N/ano;

EF_5 = Fator de emissão para emissões de N_2O da lixiviação e escoamento de N, kg $N_2O - N$ / kg N lixiviado e escoamento;

F_{SOM} = Quantidade anual de N mineralizado em solos minerais associada à perda de C do solo matéria orgânica como resultado de mudanças no uso ou gestão da terra em regiões onde ocorre lixiviação/ escoamento, kg N/ano;

$Frac_{LEACH-(H)}$ = Fração de todo o N adicionado/mineralizado em solos manejados em regiões onde ocorre lixiviação/ escoamento que é perdido por lixiviação e escoamento, kg N / (kg de adições de N).

Após cálculos adotar a equação 21 para converter $N_2O_{(ATD)}$ e $N_2O_{(L)}$ em N_2O .

4.3.3.2 Dados da atividade para os cálculos das emissões diretas e indiretas de N_2O .

Tabela 10 – Fatores de emissão para emissões diretas e indiretas.

Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Fator de emissão para emissões diretas de N_2O a partir de entradas de N (F_{SN} , $F_{ONE}F_{CR}$) (EF_1)	0,01	$\frac{kg\ N_2O - N}{kg\ N\ input}$	IPCC (2019c)
Fator de emissão para emissões diretas de N_2O de entradas de N para arroz inundado (EF_{1FR})	N/A	N/A	IPCC (2019c)
$EF_{3(s)}$ = Fator de emissão para emissões diretas de N_2O provenientes do sistema de gestão de dejetos S,	0,01	$\frac{kg\ N_2O - N}{kg\ de\ N\ excretado}$	IPCC (2019c)
Fator de emissão para emissões diretas de N_2O da urina e do esterco N depositado em pastagens, campos e piquetes por animais em pastejo ($EF_{3PRP, CPP}$)	0,015	$\frac{kg\ N_2O - N}{kg\ N\ input}$	Brasil (2020d)

Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Fator de emissão para emissões diretas de N_2O da urina e do esterco N depositado em pastagens, campos e piquetes por animais em pastejo ($EF_{3PRP,SO}$)	N/A	N/A	IPCC(2019c)
Fator de emissão para emissões indiretas por volatilização de NH_3 de F_{SN} , F_{ON} , F_{PRP} (EF_4)	0,01	$\frac{kg\ N_2O - N}{kg\ NH_3 - N + NO_x - N\ volatilizada}$	IPCC(2019c)
Fator de emissão para emissões indiretas por lixiviação e escoamento de N das fontes de F_{SN} , F_{ON} , F_{PRP} e F_{SOM} (EF_5)	0,011	$\frac{kg\ N_2O - N}{(kg\ N\ lixiviado\ e\ escoamento)}$	IPCC(2019c)

N/A – Não se aplica

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Tabela 11 – Parâmetros para as emissões diretas e indiretas de solos manejados.

Parâmetro	Categoria	Valor	Unidade	Fonte
Fertilizantes Sintéticos (F_{SN})	-	959	kg/ano	Propriedade
Fração de azoto do estrume gerido para animais da categoria T que é perdida por volatilização no sistema de gestão de estrume S como NH_3 ou NO_x ($FRAC_{GAS}$)	Bovinos <1 ano	0,45	Adimensional	IPCC (2019c)
	Bovinos > 1 ano < 2 anos	0,45	Adimensional	IPCC (2019c)
	Fêmeas > 2 anos	0,45	Adimensional	IPCC (2019c)
	Alta produção	0,3	Adimensional	IPCC (2019c)
Fração de azoto do estrume gerido para animais da categoria T que se perde no sistema de gestão de estrume S por lixiviação ou escoamento ($FRAC_{LEACHS}$)	Bovinos <1 ano	0,02	Adimensional	IPCC (2019c)
	Bovinos > 1 ano < 2 anos	0,02	Adimensional	IPCC (2019c)
	Fêmeas > 2 anos	0,01	Adimensional	IPCC (2019c)
	Alta produção	0,02	Adimensional	IPCC (2019c)
	Bovinos <1 ano	0,03	Adimensional	IPCC (2019c)

Parâmetro	Categoria	Valor	Unidade	Fonte
Frac _{N₂ MS(S)} = Fração de azoto do estrume gerido que se perde no sistema de gestão do estrume S como N ₂	Bovinos > 1 ano < 2 anos	0,03	Adimensional	IPCC (2019c)
	Fêmeas > 2 anos	0,03	Adimensional	IPCC (2019c)
	Alta produção	0,03	Adimensional	IPCC (2019c)
Quantidade de nitrogênio da cama (N _{beddingMS})	N/A	N/A	kg N/animal/ano	IPCC (2019c)
Quantidade de nitrogênio de co-digeridos adicionados às plantas de biogás, como resíduos de alimentos ou culturas cultivadas especificamente N _{cdg}	N/A	N/A	kg N/ano	IPCC (2019c)
Razão de emissões de N ₂ :N ₂ O (RN ₂)	Bovinos <1 ano	3	kg N ₂ - N / kg N ₂ O - N	IPCC (2019c)
	Bovinos > 1 ano < 2 anos	3	kg N ₂ - N / kg N ₂ O - N	IPCC (2019c)
	Fêmeas > 2 anos	3	kg N ₂ - N / kg N ₂ O - N	IPCC (2019c)
	Alta produção	3	kg N ₂ - N / kg N ₂ O - N	IPCC (2019c)
Teor de N dos resíduos acima do solo para a cultura T (N _{AG})	Milho	0,01	kg N/ kg d.m.	Brasil (2020d)
Teor de N dos resíduos acima do solo para a cultura T (N _{AG})	Cana-de-açúcar	0,01	kg N/ kg d.m.	Brasil (2020d)
Teor de N dos resíduos acima do solo para a cultura T (N _{AG})	Pastagem	0,01	kg N/ kg d.m.	IPCC (2019c)
Fração de resíduos acima do solo da cultura T removidos anualmente para fins como alimentação, cama e construção (FRAC _{Remove})	Milho	N/A	N/A	IPCC (2019c)
Fração de resíduos acima do solo da cultura T removidos anualmente para fins como	Cana-de-açúcar	N/A	N/A	IPCC (2019c)

Parâmetro	Categoria	Valor	Unidade	Fonte
alimentação, cama e construção (FRAC _{Remove})				
Fração de resíduos acima do solo da cultura T removidos anualmente para fins como alimentação, cama e construção (FRAC _{Remove})	Pastagem	N/A	N/A	IPCC (2019c)
Fração da área anual colhida da cultura T queimada (FRAC _{Burnt})	Milho	N/A	N/A	IPCC (2019c)
Fração da área anual colhida da cultura T queimada (FRAC _{Burnt})	Cana-de-açúcar	N/A	N/A	IPCC (2019c)
Fração da área anual colhida da cultura T queimada (FRAC _{Burnt})	Pastagem	N/A	N/A	IPCC (2019c)
Fator de combustão (C _f)	Milho	N/A	N/A	IPCC (2019c)
Fator de combustão (C _f)	Cana-de-açúcar	N/A	N/A	IPCC (2019c)
Fator de combustão (C _f)	Pastagem	N/A	N/A	IPCC (2019c)
Teor de N dos resíduos subterrâneos para a cultura T (N _{BG})	Milho	0,014	kg N/ kg d.m.	Brasil (2020d)
Teor de N dos resíduos subterrâneos para a cultura T (N _{BG})	Cana-de-açúcar	0,006	kg N/ kg d.m.	Brasil (2020d)
Teor de N dos resíduos subterrâneos para a cultura T (N _{BG})	Pastagem	0,006	kg N/ kg d.m.	Brasil (2020d)
Produção anual da cultura (P)	Milho	10,000	t	Propriedade
Produção anual da cultura (P)	Cana-de-açúcar	25,000	t	Propriedade
Produção anual da cultura (P)	Pastagem	30,000	t	Propriedade
Fração de matéria seca das culturas colhidas (DRY)	Milho	0,87	kg d.m. / kg de peso fresco	Brasil (2020d)
Fração de matéria seca das culturas colhidas (DRY)	Cana-de-açúcar	0,87	kg d.m. / kg de peso fresco	Brasil (2020d)

Parâmetro	Categoria	Valor	Unidade	Fonte
Fração de matéria seca das culturas colhidas (DRY)	Pastagem	0,85	kg d.m. / kg de peso fresco	IPCC (2019c)
Razão entre a matéria seca dos resíduos acima do solo e o rendimento colhido para a cultura T $\text{Crop}_{(T)}$ (R_{AG})	Milho	1,492	Adimensional	Brasil (2020d)
Razão entre a matéria seca dos resíduos acima do solo e o rendimento colhido para a cultura T $\text{Crop}_{(T)}$ (R_{AG})	Cana-de-açúcar	1,000	Adimensional	IPCC (2019c)
Razão entre a matéria seca dos resíduos acima do solo e o rendimento colhido para a cultura T $\text{Crop}_{(T)}$ (R_{AG})	Pastagem	1,000	Adimensional	IPCC (2019c)
Área	Milho	0,50	ha/ano	Propriedade
Área	Cana-de-açúcar	0,53	ha/ano	Propriedade
Área	Pastagem	4,48	ha/ano	Propriedade
Fração da área total sob a cultura T que é renovada anualmente ($\text{Frac}_{\text{Renew}}$)	Milho	1,000	Adimensional	IPCC (2019c)
Fração da área total sob a cultura T que é renovada anualmente ($\text{Frac}_{\text{Renew}}$)	Cana-de-açúcar	1,000	Adimensional	IPCC (2019c)
Fração da área total sob a cultura T que é renovada anualmente ($\text{Frac}_{\text{Renew}}$)	Pastagem	0,100	Adimensional	IPCC (2019c)
Razão de biomassa da raiz abaixo do solo para biomassa da parte aérea acima do solo para a cultura T (RS)	Milho	0,22	Adimensional	IPCC (2019c)
Razão de biomassa da raiz abaixo do solo para biomassa da parte aérea acima do solo para a cultura T (RS)	Cana-de-açúcar	0,22	Adimensional	IPCC (2019c)
Razão de biomassa da raiz abaixo do solo para biomassa da	Pastagem	0,22	Adimensional	IPCC (2019c)

Parâmetro	Categoria	Valor	Unidade	Fonte
parte aérea acima do solo para a cultura T (RS)				
Número de cabeças de gado da espécie/categoria T ($N_{(T)}$)	Bovinos <1 ano	4,000	Cabeça	Propriedade
Número de cabeças de gado da espécie/categoria T ($N_{(T)}$)	Bovinos > 1 ano < 2 anos	4,000	Cabeça	Propriedade
Número de cabeças de gado da espécie/categoria T ($N_{(T)}$)	Fêmeas > 2 anos	6,000	Cabeça	Propriedade
Número de cabeças de gado da espécie/categoria T ($N_{(T)}$)	Alta produção	10,000	Cabeça	Propriedade
Fração da excreção anual total de N para cada espécie/categoria de gado T que é depositada em pastagens, pastagens e piquetes (MS)	Bovinos <1 ano	1,000	Adimensional	Brasil (2020d)
Fração da excreção anual total de N para cada espécie/categoria de gado T que é depositada em pastagens, pastagens e piquetes (MS)	Bovinos > 1 ano < 2 anos	1,000	Adimensional	Brasil (2020d)
Fração da excreção anual total de N para cada espécie/categoria de gado T que é depositada em pastagens, pastagens e piquetes (MS)	Fêmeas > 2 anos	1,000	Adimensional	Brasil (2020d)
Fração da excreção anual total de N para cada espécie/categoria de gado T que é depositada em pastagens, pastagens e piquetes (MS)	Alta produção	0,864	Adimensional	Brasil (2020d)
Fração de N do fertilizante sintético que se volatiliza como NH_3 e NO_x ($FRAC_{GASF_i}$)	N/A	0,11	kg de N volatilizado /kg de N aplicado	IPCC (2019c)
Fração de materiais fertilizantes orgânicos nitrogenados aplicados (F_{ON}) e de N depositado na urina e no esterco por animais em	N/A	0,21	kg de N volatilizado /(kg de N aplicado e/ou depositado	IPCC (2019c)

Parâmetro	Categoria	Valor	Unidade	Fonte
pastejo (F_{PRP}) que se volatiliza como NH_3 e NO_x $FRAC_{GASM}$)				
Fração de todo o N adicionado/mineralizado em solos manejados em regiões onde ocorre lixiviação/ escoamento que é perdido por lixiviação e escoamento ($FRAC_{LEACH-(H)}$)	N/A	0,24	kg N / (kg de adições de N)	IPCC (2019c)

N/A – Não se aplica

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Alguns parâmetros não foram calculados por não se aplicarem à realidade da propriedade analisada. Destaca-se, por exemplo, a emissão decorrente do manejo de solos orgânicos (N_2O - NO_S), uma vez que o solo local não apresenta características desse tipo de manejo.

Também foi excluída a estimativa anual de nitrogênio mineralizado em solos minerais associada à perda de carbono da matéria orgânica do solo, resultado de alterações no uso ou na gestão da terra em áreas com ocorrência de lixiviação e/ou escoamento (F_{SOM}). Com base na definição estabelecida pelo IPCC (2019c), concluiu-se que tal parâmetro não era aplicável, visto que não houve mudanças no uso do solo da propriedade.

4.3.3.3 Calagem

As emissões de calagem são calculadas pela equação 34, desagregada na equação 35.

$$CO_2 - CEmission = M_{dolomite} \cdot EF_{dolomite} \quad 34$$

Onde:

$CO_2 - CEmission$ = Emissões anuais de C da aplicação de cal, t/ano;

$M_{dolomite}$ = Quantidade anual de dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), t/ano;

$EF_{dolomite}$ = Fator de emissão, t/ha.

Para calcular M_{dolomite} , tem-se:

$$M_{\text{dolomite}} = \text{Dose}_{\text{dolomite}} \cdot \text{área} \quad 35$$

Onde:

M_{dolomite} = Quantidade anual de dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), t/ano;

$\text{Dose}_{\text{dolomite}}$ = Dose média de calcário dolomita, t/ha;

Área = área de aplicação do calcário, ha.

Para converter o $\text{CO}_2 - \text{CEmission}$ em CO_2 , tem-se:

$$\text{CO}_2 = \text{CO}_2 - \text{CEmission} \cdot \frac{44}{12} \quad 36$$

4.3.3.4 Dados da atividade para os cálculos das emissões de CO_2

Tabela 12 – Fatores para o cálculo de aplicação de calcário

Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Quantidade anual de dolomita (M_{dolomite})	8,96	t/ano	Propriedade
Fator de emissão de calcário	0,13	t/ha	IPCC (2006b)
$\text{Dose}_{\text{dolomite}}$	2	t/ha	Propriedade
Área	4,5	ha	Propriedade

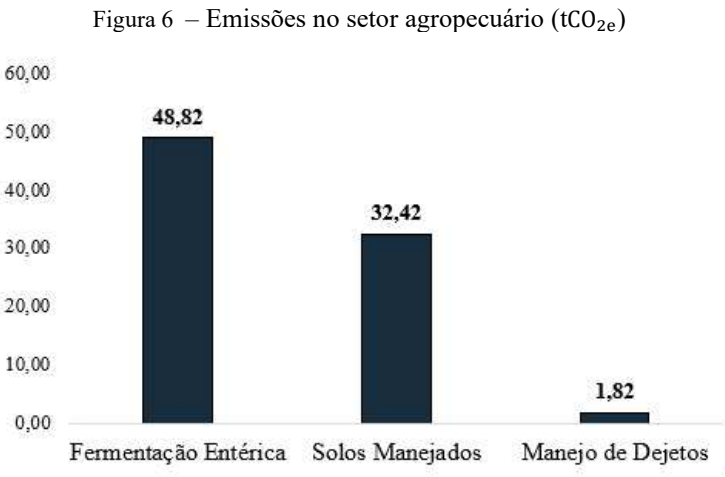
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Emissões totais do setor agropecuário na propriedade

No Figura 6 apresenta as emissões de gases de efeito estufa (GEE), expressas em toneladas de CO_2 equivalente (tCO_{2e}), provenientes das atividades agropecuárias desenvolvidas

na propriedade estudada. As emissões foram separadas em 3 categorias, sendo elas: Fermentação Entérica, Manejo de Dejetos e Solos Manejados. Essas emissões decorrem da liberação de metano (CH_4) durante o processo de digestão dos ruminantes e no manejo de dejetos, além da emissão de óxido nitroso (N_2O) — tanto direta quanto indiretamente — no manejo de dejetos e nos solos manejados. Também é considerado as emissões de dióxido de carbono (CO_2) provenientes da prática de calagem aplicada ao solo.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

As emissões provenientes de fermentação entérica, solos manejados e manejo de dejetos foram de 48, 82 tCO_{2e} , 32,42 tCO_{2e} e 1,82 tCO_{2e} , respectivamente. Ao comparar esses resultados com os dados do relatório “Análise das Emissões de Gases de Efeito Estufa: E suas Implicações para Metas Climáticas do Brasil 1970 – 2023 (SEEG, 2024) para o estado de Minas Gerais e as emissões totais do município de Caputira, reportados pelo SEEG (2023), foi possível analisar os valores representados na Tabela 13.

Tabela 13 – Emissões no setor agropecuário						
Categoria	Propriedade		Municipal (SEEG, 2023)		Estadual (SEEG, 2024)	
	tCO_{2e}	%	tCO_{2e}	%	MtCO_{2e}	%
Fermentação Entérica	48,82	58,78	9268	64,79	38	63,32
Solos Manejados	32,42	39,03	4353	30,43	19	31,66
Manejo de Dejetos	1,82	2,19	683	4,77	3	5
Outros	-	-	-	-	0,013	0,02

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A análise comparativa entre os dados da propriedade, do estado de Minas Gerais e do município revela que, apesar das diferenças de escala, as principais fontes de emissão de gases de efeito estufa (GEE) seguem um padrão semelhante, com destaque para a fermentação entérica e solos manejados.

A fermentação entérica representa a maior parte das emissões no setor agropecuário, com 58,78% na propriedade, 64,79% no município e 63,32% no estado. Esses valores confirmam a forte influência da atividade pecuária, em especial da bovinocultura, na liberação de metano. Já as emissões por solos manejados têm uma participação mais expressiva na propriedade (39,03%) do que nos dados municipais (30,43%) e estaduais (31,66%). Esse resultado pode estar relacionado ao uso mais intensivo do solo ou as práticas de manejo que favoreçam a liberação de óxido nitroso, como por exemplo a adubação nas áreas de plantio de café com adubo NPK 25 05 20, que é aplicado em períodos de chuva.

Em um estudo realizado por Zeng et al. (2014), foi demonstrado que a aplicação de fertilizantes, como o NPK, pode aumentar as emissões de óxido nitroso (N_2O) devido à intensa atividade microbiana no solo, especialmente quando a adubação ocorre durante a época chuvosa. Nesse período, a elevada umidade do solo, aliada à temperatura favorável, potencializa os processos de nitrificação e desnitrificação, principais responsáveis pela liberação de N_2O . Além disso, a forma do nitrogênio presente no fertilizante influencia a magnitude dessas emissões.

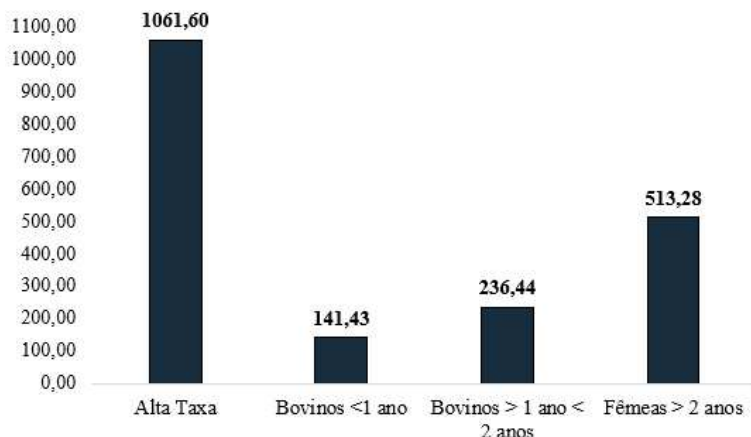
Por outro lado, o manejo de dejetos representa uma fração menor das emissões na propriedade (2,19%), enquanto nos níveis municipal estadual esse percentual é mais alto (4,77% e 5%, respectivamente). Essa diferença pode estar relacionada à ausência de sistemas de confinamento, bem como às práticas locais de manejo de dejetos. A menor concentração de animais na propriedade contribui para um acúmulo reduzido de resíduos orgânicos, o que influencia diretamente os índices de emissão observados. Nas seções de 5.1 a 5.3 são analisados de forma detalhada as emissões de cada categoria.

5.2 Emissões Totais na Fermentação Entérica

Ao analisar as emissões totais no subsetor de fermentação entérica na propriedade, foi possível perceber que as maiores emissões estão associadas as vacas leiteiras, representado 1061,60 kgCH₄/ano, ou seja 54,36% das emissões, seguidas pelas fêmeas maiores que 2 anos, com 513,28 kgCH₄/ano, (26,28%), depois tem-se os bovinos entre 1 ano e 2 anos, com 236,44

kgCH₄/ano, (12,11%) e por último, os bovinos menores de 1 ano com 141,43 kgCH₄/ano (7,24%), conforme apresenta no Figura 7.

Figura 7- Emissões de CH₄ no subsetor de fermentação entérica (kg CH₄/ano)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

As emissões no subsetor de fermentação entérica, segundo os dados do SEEG (2024), a bovinocultura de corte é responsável por 89% das emissões no estado de Minas Gerais, enquanto os bovinos de leite representam apenas 11%. Esses dados indicam que, em nível estadual, a criação de bovinos é majoritariamente voltada para o abate. No entanto, ao se observar a realidade do município de Caputira, a situação se inverte: os bovinos de corte representam 14,9% do rebanho, enquanto os bovinos de leite correspondem a 22,3% (IBGE, 2017b). Isso reflete uma tendência local em priorizar a produção leiteira, tanto para o consumo próprio quanto para a comercialização e transformação em produtos como queijos e iogurtes.

Além disso, no contexto brasileiro, a produção de leite é majoritariamente realizada por agricultores familiares. De acordo com o Censo Agropecuário 2017-2018, esse segmento foi responsável por 64,2% da produção nacional (Neto *et al.*, 2020).

É fundamental considerar os fatores de emissão específicos de cada subcategoria animal na propriedade, uma vez que esses valores estão ligados ao total de metano emitido pela fermentação entérica. Isso ocorre porque o fator de emissão é multiplicado pelo número de animais em cada categoria. Ao comparar os fatores de emissão obtidos nos cálculos da propriedade com os valores encontrados na literatura (ver Tabela 14), observa-se que o maior valor corresponde aos bovinos de leite de alta produtividade, seguidos pelas fêmeas com mais de dois anos, bovinos entre um e dois anos e, por fim, os bovinos com menos de um ano. Essa distribuição evidencia que as diferentes fases de desenvolvimento dos animais influenciam diretamente o volume de emissões geradas.

Tabela 14 – Fatores de emissão de CH₄ na propriedades x fator de emissão da literatura

Categoria	Propriedade (kgCH ₄ /cabeça/ano)	Literatura (kgCH ₄ /cabeça/ano) (Brasil, 2020a)
Alta taxa	118	87
Bovinos < 1 ano	35,4	34
Bovinos >1 ano < 2 anos	59,1	52
Fêmeas > 2 anos	85,5	78

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A diferença entre os fatores de emissão de metano (CH₄) por fermentação entérica observados na propriedade e os valores apresentados na literatura pode ser atribuída aos critérios específicos adotados para calcular as emissões conforme a realidade da propriedade, especialmente em relação à produção de leite do rebanho. Ao realizar os cálculos das emissões, observou-se que a maior produtividade leiteira está associada a um aumento na geração de gases de efeito estufa (GEE), o que justifica o fato de animais de alta produção emitirem mais.

Visando a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes da fermentação entérica, que é a principal fonte de emissões na propriedade, podem ser adotadas estratégias de mitigação voltadas à melhoria da dieta animal. Na propriedade em questão, as pastagens representam uma das principais fontes de alimentação dos bovinos. No entanto, as áreas de pastagens geralmente apresentam baixo teor de carboidratos não fibrosos e elevado conteúdo de fibras e lignina, o que reduz a digestibilidade dos alimentos e favorece o aumento das emissões de metano entérico (Sene *et al.*, 2019).

Uma das alternativas para reduzir as emissões de metano entérico é a inclusão de silagem de milho na dieta dos bovinos, pois melhora o valor energético da alimentação e reduz a produção de metano por unidade de alimento digerido (Hristov *et al.*, 2013). No entanto, essa prática pode representar um custo adicional à propriedade, já que a produção ou aquisição da silagem exige investimentos maiores do que o manejo de pastagens convencionais.

Outra estratégia, que é implementada na propriedade, destaca-se o uso de pastagem com menor teor de lignina, que contribui no melhoramento da digestibilidade da dieta dos animais. No local, utiliza-se o capim *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Em um estudo conduzido por Velásquez *et al.* (2019), foram comparados diferentes tipos de capim — *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés (MG-5), *Panicum maximum* cv. Mombaça,

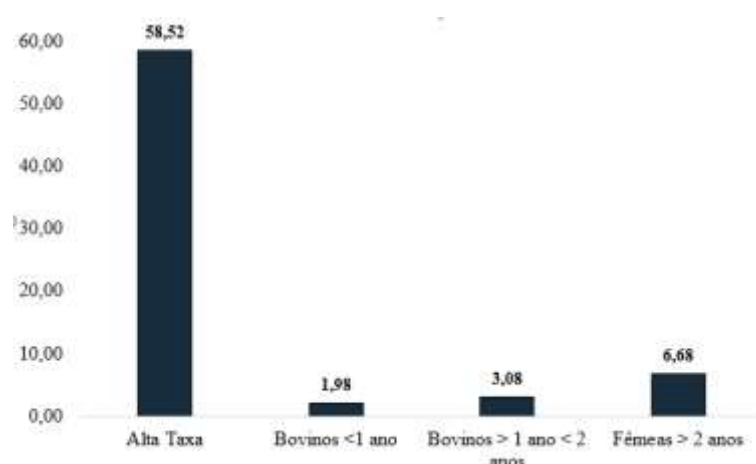
Pennisetum purpureum cv. Cameroon e *Pennisetum purpureum* cv. Napier — e os resultados mostraram que *Panicum maximum* cv. Mombaça e *Brachiaria brizantha* cv. Marandu apresentaram os menores teores de lignina, tornando-os mais indicados para melhorar a digestibilidade.

Além disso, a produtividade das pastagens tende a cair durante períodos de seca, o que reforça a necessidade de investir tanto no seu manejo quanto em estratégias de suplementação alimentar. De acordo com Genro *et al.* (2023), dietas com maior proporção de concentrados podem reduzir as emissões entéricas em até 20%, enquanto o aumento do teor proteico na dieta pode contribuir com uma redução de até 10%.

Nesse contexto, recomenda-se o fornecimento estratégico de alimentos concentrados em determinados períodos do dia, especialmente durante a estiagem. Essa prática auxilia os animais a atenderem suas exigências nutricionais, reduzindo a pressão sobre as pastagens, melhorando a digestibilidade e a absorção de nutrientes e, consequentemente, aumentando a produtividade leiteira. Além disso, a suplementação com concentrados de alta qualidade nutricional pode resultar em ganhos significativos na produção de leite, embora represente um custo adicional para a propriedade. Para enriquecer a dieta com proteínas de qualidade, podem ser utilizados alimentos como farelo de soja, óleo de linhaça, óleo de palma e semente de algodão (SEEG, 2022).

5.3 Emissões totais no manejo de dejetos

As emissões totais de metano provenientes do manejo de dejetos foram estimadas em 69,66 kgCH₄/ano, sendo: 58,52 kgCH₄/ano para bovinos leiteiros de alta produção, 1,98 kgCH₄/ano para bovinos menores de 1 ano, 3,08 kgCH₄/ano para bovinos maiores que 1 ano e menores que 2 anos e para as fêmeas maiores que 2 anos obteve-se 6,68 kgCH₄/ano (Figura 8).

Figura 8 - Emissões de CH₄ no subsetor de manejo de dejetos (kgCH₄/ano)

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Conforme a Tabela 15 verifica-se que todos os valores estimados para o fator de emissão de metano (CH₄) foram inferiores aos reportados na literatura para as respectivas categorias de bovinos. A maior redução foi observada na categoria de bovinos leiteiros de alta taxa, cujo fator de emissão foi de 6,5 kgCH₄/cabeça/ano, representando uma diminuição de 48,41% em relação ao valor da literatura (12,9 kgCH₄/cabeça/ano). Reduções também foram observadas nas demais categorias: bovinos com menos de um ano (0,5 vs. 0,8 kgCH₄/cabeça/ano, -37,5%), fêmeas com mais de dois anos (1,1 vs. 1,4 kgCH₄/cabeça/ano, -21,43%) e bovinos entre um e dois anos (0,8 vs. 0,9 kgCH₄/cabeça/ano, -11,11%).

Tabela 15- Fatores de emissão de CH₄ na propriedades x fator de emissão da literatura

Categoria	Propriedade (kgCH ₄ /cabeça/ano)	Literatura (kgCH ₄ /cabeça/ano) (Brasil, 2020d)
Alta taxa	6,5	12,9
Bovinos < 1 ano	0,5	0,8
Bovinos > 1 ano < 2 anos	0,8	0,9
Fêmeas > 2 anos	1,1	1,4

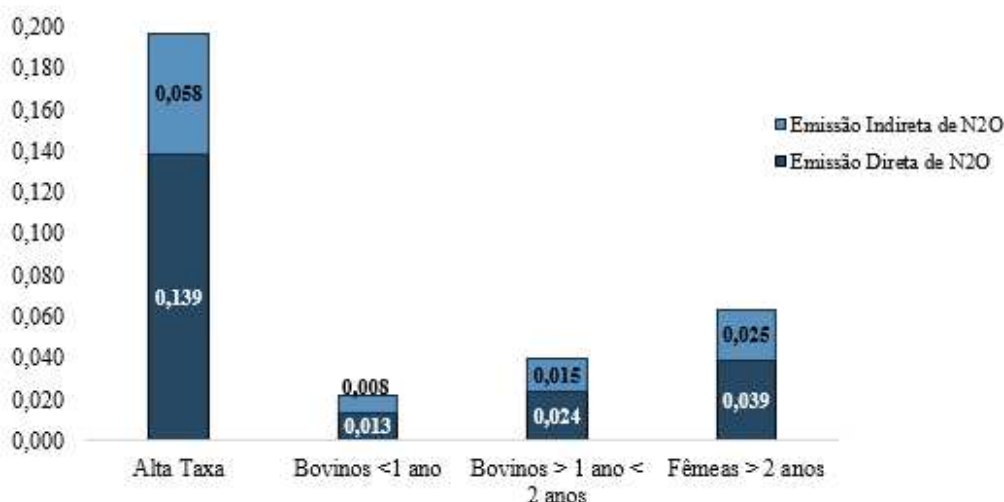
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Essas diferenças podem ser atribuídas, principalmente, ao sistema de manejo adotado na propriedade, que se baseia no manejo a pasto e armazenamento sólido em pilhas acumuladas no curral. Em sistemas onde o esterco é manejado na forma sólida, como ocorre com pilhas amontoadas ou quando os dejetos são diretamente depositados sobre pastagens, há maior dispersão da matéria orgânica no solo e predominância de condições aeróbias, o que favorece

sua degradação com menor produção de metano. Por outro lado, sistemas de manejo líquido, como tanques ou lagoas anaeróbias, criam condições ideais para a decomposição anaeróbia da matéria orgânica, produzindo maior geração de CH_4 (IPCC, 2006a).

Além das emissões de metano, foram estimadas as emissões diretas e indiretas de óxido nitroso (N_2O), outro importante gás de efeito estufa. As emissões diretas totalizaram 0,215 $\text{kgN}_2\text{O}/\text{ano}$, enquanto as emissões indiretas somaram 0,106 $\text{kgN}_2\text{O}/\text{ano}$. Isso indica que aproximadamente 67% das emissões totais de N_2O derivadas do manejo de dejetos são de origem direta. A Figura 9 ilustra a distribuição das emissões diretas e indiretas por categoria animal.

Figura 9 - Emissões de N_2O no subsetor de manejo de dejetos ($\text{kgN}_2\text{O}/\text{ano}$)



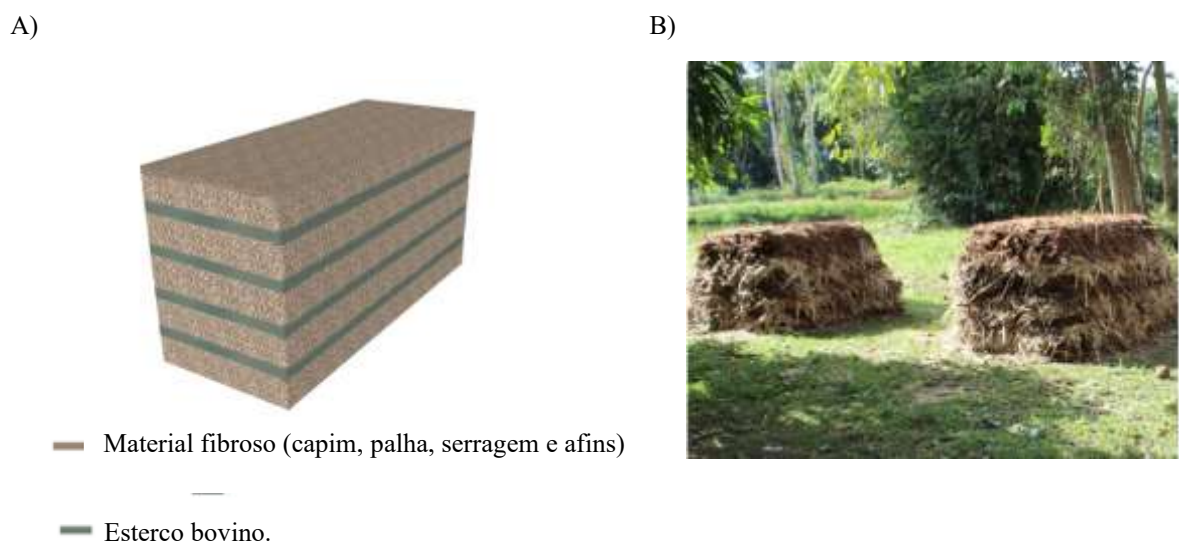
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A predominância das emissões diretas está ligada a parte dos dejetos serem armazenados em pilhas amontoadas no curral, o nitrogênio permanece mais concentrado no local de origem, favorecendo os processos microbiológicos de nitrificação e desnitrificação, responsáveis pela geração direta de N_2O (Vandré et. al, 2013). Em contrapartida, as emissões indiretas de óxido nitroso (N_2O) ocorrem após a perda de nitrogênio do sistema de manejo, seja por volatilização ou por lixiviação. Nessas situações, o nitrogênio perdido pode ser posteriormente transformado em N_2O pelo contato com o solo ou corpos d'água. Segundo o IPCC (2019b) a eficiência dessa conversão secundária depende de uma série de condições ambientais, sobretudo da disponibilidade de oxigênio, da temperatura e do tempo de permanência do nitrogênio no meio, fatores que afetam diretamente a atividade microbiana envolvida na transformação do nitrogênio em formas gasosas.

A partir da identificação das emissões de óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4) provenientes do manejo de dejetos, é possível adotar alternativas de mitigação, como o uso de biodigestores e compostagem em substituição às pilhas amontoadas no curral, que são fontes significativas de gases de efeito estufa (GEE). Essas práticas estão alinhadas com as estratégias do Plano ABC+, que incentiva o tratamento adequado dos dejetos animais por meio de tecnologias sustentáveis, visando a redução das emissões e a promoção de uma pecuária de baixa emissão de carbono. Além de incentivar a estratégia do Plano ABC+ quanto o incentivo às práticas conservacionistas (Brasil, 2021).

O uso de compostagem, de forma sucinta consiste em pegar o esterco que foi empilhado e adicionar materiais orgânicos que sejam ricos em carbono, como maravalha, capim, resíduos de poda, serragem, palha e afins. Com o tempo, através dos processos de decomposição essa biomassa pode ser utilizada como insumo agrícola para a propriedade, seja para o uso em hortas, áreas de plantio de café, pastagem/ capineiras e afins. Essa biomassa é gerada com menor emissão de metano, pois evita a decomposição anaeróbia dos dejetos que não são tratados (SEEG, 2022). Na Figura 10 tem-se a representação da ordem de empilhamento dos compostos, vale ressaltar que ao montar as pilhas tem que molhar os resíduos.

Figura 10 – Representação esquemática da ordem de empilhamento dos compostos

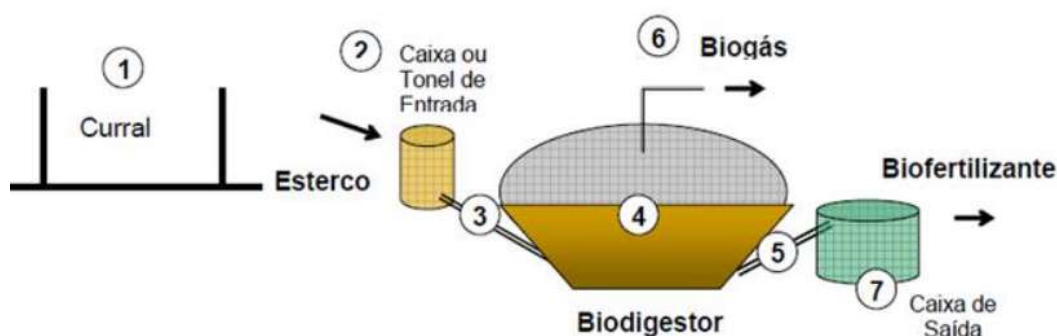


Fonte: Adaptado Borges, 2018.

Outra alternativa que pode ser adotada é a biodigestão, que consiste na decomposição de matéria orgânica através de microrganismos presentes no esterco em ambientes submetidos a ausência de oxigênio (anaeróbio), o que gera como produto o biogás e biofertilizante. O biogás

pode ser adotado como aproveitamento energético para a geração de energia elétrica ou utilizado diretamente, como gás combustível (SEEG, 2022). Enquanto o biofertilizante produzido pode ser usado como fertilizante orgânico, contribuindo na melhorar fertilidade do solo, estímulo da atividade microbiana e aumento da retenção de água. Na Figura 11 é representado um modelo de sistema de biodigestão.

Figura 11 – Esboço de sistema de biodigestão

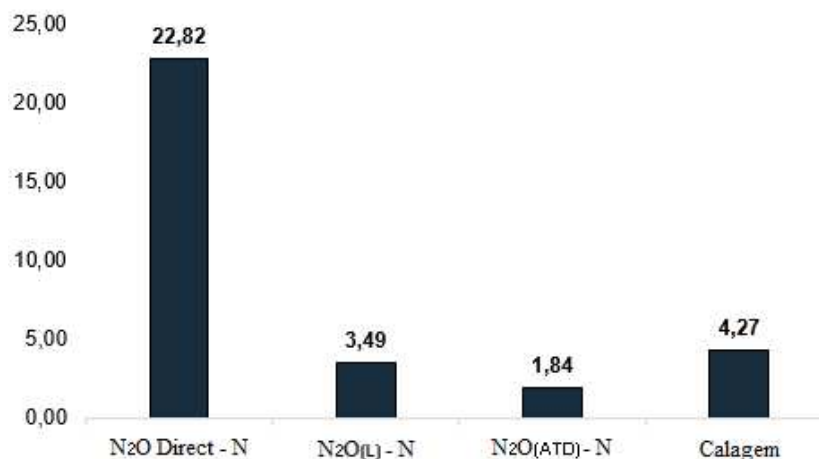


Fonte: Torres et. al (2012).

Segundo Torres et. al (2012), a numeração 1 contida na Figura 11 representa o local onde fica armazenado o esterco; o número 2 indica a caixa tonel de entrada, onde os dejetos são misturados com água; o número 3 refere-se à tubulação de entrada, que permite a mistura no interior do biodigestor. O número em 4 representa o próprio biodigestor, onde ocorre o processo de digestão anaeróbica. Já em 5 indica a tubulação de saída de biofertilizante, que transporta o líquido fermentado à caixa de saída; o número 6 representa a tubulação de saída de biogás e por fim, na numeração 7 é a caixa de saída do biofertilizante, que futuramente é utilizado nos cultivos.

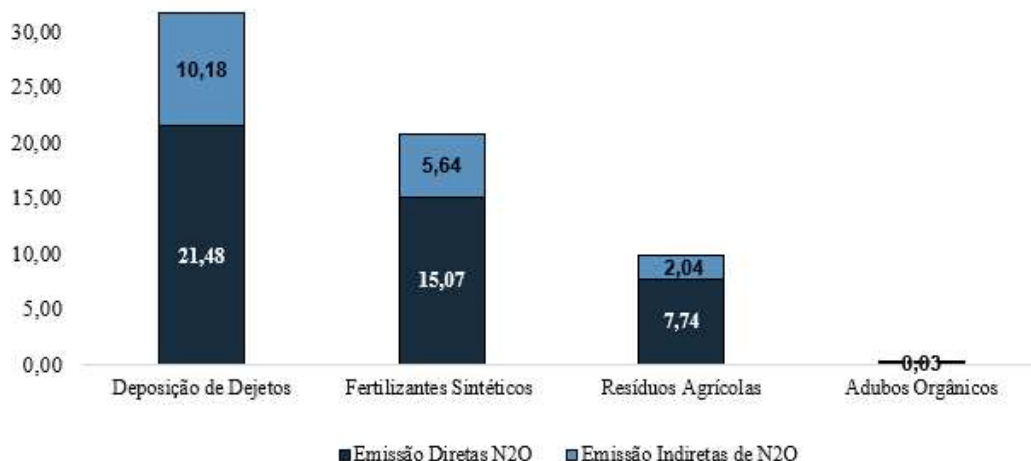
5.4 Emissões totais de solos manejados

A Figura 12 apresenta as emissões de gases de efeito estufa da categoria de solos manejados. Observa-se que a maior contribuição foi das emissões diretas, totalizando 22,82 tCO_{2e}. Em seguida, destaca-se a calagem, com 4,27 tCO_{2e}, e, por fim, as emissões indiretas, que totalizam em 5,33 tCO_{2e}, sendo divididas em emissões indiretas de NO₂ originados de N lixiviado (3,49 tCO_{2e}/ano) e emissões indiretas de NO₂ da deposição atmosférica (1,84 tCO_{2e}/ano).

Figura 12 – Emissões em solos manejados (tCO_{2e}/ano)

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Ao desagregar as diferentes fontes de emissão de N₂O na propriedade, conforme apresentado no Figura 13, destaca-se a deposição de dejetos em pastagens com a maior contribuição de emissões de óxido nitroso, representando 50,92%, (31,66kgN₂O/ano). Em seguida, tem-se os fertilizantes sintéticos que contribuíram com cerca de 33,31% (20,71 kgN₂O/ano), enquanto os resíduos agrícolas corresponderam a 15,73% (9,78 kgN₂O/ano) e os adubos orgânicos apresentaram a menor emissão, com apenas 0,05% (0,03 kgN₂O/ano).

Figura 13 - Emissões diretas e indiretas de diferentes fontes (kgN₂O/ano)

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Ao comparar os resultados obtidos na propriedade com os dados de emissões de N₂O reportados pela plataforma do SEEG (2023) para o município de Caputira, observa-se uma similaridade no perfil de fontes mais representativas. Em nível municipal, a deposição de dejetos em pastagem aparece como a principal fonte de emissão (59,13%), seguida por resíduos agrícolas (31,44%), fertilizantes sintéticos (3,97%) e adubos orgânicos (2,78%). De forma

geral, a distribuição das emissões na propriedade também evidência a predominância da deposição de dejetos.

A principal diferença está na posição relativa das emissões por fertilizantes sintéticos, que na propriedade ocupam o segundo lugar, enquanto no município de Caputira os resíduos agrícolas são a segunda maior fonte. Essa diferença pode ser associada ao manejo específico da propriedade, que apresenta um uso mais intenso de fertilizantes devido à adubação das lavouras de café, cultura que demanda maior aporte de nitrogênio, visto que aumenta a área foliar, crescimento da vegetação e formação dos botões florais (Reis *et al*, 2006; Cerri, 2013).

Vale ressaltar, contudo, que as fórmulas utilizadas para estimativa das emissões de fertilizantes sintéticos consideram apenas os processos diretamente relacionados à sua aplicação no solo, desconsiderando as emissões provenientes das etapas anteriores da cadeia produtiva, como a extração mineral e o beneficiamento das rochas utilizadas na formulação dos fertilizantes sintéticos. Essas etapas envolvem elevado consumo energético e liberação de gases de efeito estufa, contribuindo para o impacto ambiental total, especialmente em sistemas agrícolas com alta dependência de insumos industriais (Monteiro, 2023).

Visando práticas de mitigação das emissões de N_2O diretas e indiretas na propriedade, principalmente provenientes da deposição de dejetos e dos fertilizantes sintéticos. Ao analisar ações mitigadoras para a deposição de dejetos em pastagens, o estudo “Emissões diretas de óxido nitroso de dejetos bovinos em pastagem e mitigação por dicianodiamida (DCD)” avaliou o uso de DCD como estratégia para reduzir as emissões de N_2O provenientes da deposição de dejetos bovinos em pastagens. A DCD atua como inibidor de nitrificação, reduzindo a conversão de amônio (NH_4^+) em nitrato (NO_3^-), limitando o nitrogênio disponível para a desnitrificação, principal processo de emissão de N_2O (IPCC, 2019; Simon, 2015). Os resultados do estudo mostraram que a aplicação de DCD por pulverização na pastagem pode reduzir as emissões em até 45% no outono, sendo mais eficaz sobre a urina bovina. No entanto, a eficiência é influenciada pela estação do ano, temperatura e o tipo de dejetos, com menor efeito sobre o esterco sólido (Simon, 2015).

Além disso, é fundamental adotar um manejo mais eficiente das áreas de pastagem, uma vez que a área de pastagem atual não é suficiente para suportar a carga animal da propriedade. Essa limitação tem resultado em superpastejo, o que compromete a capacidade de regeneração da vegetação e, conseqüentemente, acelera o processo de degradação do solo e da cobertura

vegetal. Como alternativa, pode-se complementar a alimentação dos bovinos com outras fontes alimentares, conforme sugerido na seção de fermentação entérica, o que reduziria a pressão sobre as pastagens e aumentaria o tempo dos animais no curral, local onde já está previsto o tratamento dos dejetos através de compostagem ou biodigestores.

Em contrapartida, o esterco bovino proveniente do curral, aliado às soluções de compostagem e ao uso de biodigestores, conforme mencionado na seção 5.3, pode ser aproveitado como fertilizante nas áreas de pastagens. Segundo Araújo e Rosa (2021) essa prática apresenta benefícios, atuando como uma fonte acessível financeiramente e eficiente de nutrientes, especialmente o nitrogênio, essencial ao desenvolvimento das forrageiras. Além de disponibilizar nutrientes de forma gradual e contínua, a adubação orgânica contribui para a melhoria das propriedades físicas do solo, favorecendo a agregação de partículas, a retenção hídrica e o equilíbrio da microbiota (Araújo e Rosa, 2021).

Outra alternativa recomendada para a recuperação e conservação das pastagens é a adoção do pastejo rotacionado, em que a área é dividida em três ou mais piquetes e os animais são alternados entre eles, permitindo que partes da pastagem permaneça em descanso por um período (Andrade, 2008). De acordo com Pacciullo *et al.* (2014), o manejo correto da pastagem aumenta a produtividade do pasto, promove o sequestro de carbono e melhora a produção de leite.

Em uma pesquisa realizada por Segnini *et al.* (2007), pastagens de *Brachiaria decumbens* possuem a capacidade de promover um sequestro de carbono entre 6,1 a 12,8 MgCO₂/ha/ano. Considerando a média desse intervalo (9,45 MgCO₂e/ha/ano), esse valor seria suficiente para compensar as emissões anuais de 31,66 kgN₂O, equivalentes a cerca de 9,44 tCO₂e/ha/ano. Dessa forma, haveria um pequeno superávit no balanço, com a remoção líquida estimada em aproximadamente 10 kgCO₂e por hectare ao ano, indicando que, em condições médias, a pastagem seria praticamente neutra em termos de emissão líquida de gases de efeito estufa.

Como estratégias de mitigação das emissões associadas ao uso de fertilizantes sintéticos no cultivo de café, pode ser adotado o uso parcial de resíduos orgânicos (palhas, folhas, caídas, resíduos de poda e afins) com o uso de NPK 25-05-20, principal adubo aplicado na propriedade, considerando que os resíduos orgânicos isoladamente não conseguem atender as demandas nutricionais do plantio de café (Cerri, 2013). Entretanto, é necessário realizar análises

laboratoriais no solo para identificar os principais nutrientes que a cultura precisa. Outra alternativa é a aplicação do adubo em sulcos, por injeção ou via gotejamento, práticas que podem reduzir as emissões (Cerri, 2013). Essa forma de manejo diminui as perdas por volatilização de amônia, especialmente quando o nitrogênio do fertilizante é proveniente de ureia, em comparação à aplicação superficial sobre palhada. Na propriedade, a adubação é atualmente realizada de forma superficial, com o solo coberto por resíduos orgânicos (folhas e galhos da própria cultura), condição que favorece a perda de nitrogênio por volatilização.

Outra alternativa é a aplicação do adubo em sulcos, por injeção ou via gotejamento, práticas que podem reduzir as emissões (Cerri, 2013). Essa forma de manejo diminui as perdas por volatilização de amônia, especialmente quando o nitrogênio do fertilizante é proveniente de ureia, em comparação à aplicação superficial sobre palhada. Na propriedade, a adubação é atualmente realizada de forma superficial, com o solo coberto por resíduos orgânicos (folhas e galhos da própria cultura), condição que favorece a perda de nitrogênio por volatilização.

Alinhada às estratégias de redução de GEE previstas no Plano ABC+, a adoção de sistemas agroflorestais (SAFs) pode ser adotado como uma das medidas de mitigação também. Segundo Souza (2012), as árvores nesses sistemas contribuem para a proteção do solo contra processos erosivos, além de fornecerem resíduos orgânicos que melhoram as características químicas e biológicas do solo. Nesse contexto, conforme Cerri (2013) o cultivo consorciado de espécies fixadoras de nitrogênio com o cafeeiro pode reduzir a necessidade de adubação nitrogenada, e mantendo níveis adequados de produtividade.

5.5 Agricultura familiar como aliada na mitigação climática: caminhos para o mercado de PSA e sustentabilidade rural

A avaliação do balanço de emissões e remoções GEE é fundamental para compreender o impacto ambiental de propriedades rurais, especialmente em sistemas de agricultura familiar. Na propriedade em questão, as emissões totais de GEE somam 83,06 tCO_{2e} por ano, sendo 48,82 tCO_{2e} provenientes da fermentação entérica dos bovinos, 32,42 tCO_{2e} do manejo de solos e 1,82 tCO_{2e} do manejo de dejetos.

Por outro lado, a propriedade possui uma área de 15,96 ha de floresta nativa preservada no bioma Mata Atlântica, a qual exerce papel crucial no armazenamento e sequestro de carbono.

Segundo Gundersen (2021), florestas com idades superiores a 200 anos, possuem uma capacidade de sequestrar cerca de $2,4 \pm 0,8 \text{ MgC/ha/ano}$. Realizando a conversão de unidade para $\text{tCO}_2\text{e/ha/ano}$, corresponderia a $8,81 \pm 2,94 \text{ tCO}_2\text{e ha/ano}$. Considerando ainda a área total de floresta da propriedade, isso poderia equivaler a um sequestro de carbono de cerca de $140,60 \text{ tCO}_2\text{e/ano}$.

Além disso, a propriedade conta com cerca de 3,3 ha destinados ao cultivo de café Arábica, cultura perene que também contribui para a mitigação climática. Segundo estudo de Ribeiro *et al.* (2021), plantações do cultivo de café Catuaí podem sequestrar entre 4,31 e 7,10 $\text{tCO}_2\text{e/ha/ano}$. Com base na média desses valores ($5,71 \text{ tCO}_2\text{e/ha/ano}$), a lavoura de café da propriedade tem o potencial de remover aproximadamente $18,84 \text{ tCO}_2\text{e /ano}$.

Ao considerar as duas fontes de remoção de gases de efeito estufa citadas, estima-se um total de $159,44 \text{ tCO}_2\text{e/ano}$, o que contribui para que as emissões líquidas da propriedade sejam negativas, com $-76,38 \text{ tCO}_2\text{e/ano}$. Além disso, conforme sugerido nos tópicos 5.2, 5.3 e 5.4, a adoção de estratégias mais sustentáveis, como o manejo mais eficiente das pastagens, melhoramento da dieta animal e manejo adequado de solos e dejetos, pode ampliar o potencial de remoção dos GEE. Nesse contexto, destaca-se o papel estratégico da agricultura familiar no fortalecimento da resiliência climática, evidenciando sua relevância na mitigação das mudanças do clima.

Esse contexto, evidência o potencial de propriedade de agricultura familiar, como esta, participar de iniciativas ligadas ao mercado de carbono, especialmente os mecanismos de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). Com a estruturação de metodologias específicas para quantificar o sequestro de carbono em pequenos estabelecimentos, é possível que agricultores familiares recebam por práticas que resultem em remoção líquida de CO_2 da atmosfera (WRI Brasil, 2021).

O Programa Nacional de Redução de Emissões de GEE na Agricultura e o fortalecimento de iniciativas de PSA, podem ampliar o acesso da agricultura familiar a incentivos financeiros e técnicos para adoção de práticas de baixo carbono. Tais estratégias, além de contribuir para os compromissos climáticos nacionais, também promovem a valorização da produção sustentável, a geração de renda e a manutenção dos serviços ecossistêmicos em escala local e regional.

Além disso, associações como a Emater, o Senar e outras organizações rurais desempenham papel fundamental no treinamento dos agricultores sobre o funcionamento dos programas de redução de gases de efeito estufa (GEE). Essas instituições podem oferecer capacitações técnicas, esclarecimentos sobre práticas sustentáveis e orientações para a adesão a iniciativas de baixa emissão, incentivando a conservação de áreas nativas e destacando sua importância ambiental e econômica.

6. CONCLUSÃO

A partir do estudo realizado, foi possível observar que as emissões totais do setor agropecuário na propriedade seguem o mesmo padrão de representatividade observado nos níveis municipal e estadual, no qual a fermentação entérica se destaca como a principal fonte de emissão de gases de efeito estufa (GEE), seguida pelas emissões oriundas de solos manejados e do manejo de dejetos.

A análise detalhada dos fatores de emissão específicos por subcategoria animal evidenciou que as diferentes fases de desenvolvimento dos bovinos influenciam diretamente o volume de metano gerado. Os bovinos de leite de alta produtividade apresentaram os maiores índices de emissão, seguidos pelas fêmeas adultas, animais entre um e dois anos e, por fim, os bovinos com menos de um ano. Essa distribuição reforça a importância de considerar a composição do rebanho e os parâmetros zootécnicos na estimativa das emissões, garantindo maior precisão nos cálculos e nas estratégias de mitigação.

Além de identificar as principais fontes emissoras, o estudo também demonstrou que a propriedade possui grande potencial para a adoção de práticas sustentáveis, como melhorias na alimentação dos animais, alternativas para o manejo de dejetos, recuperação de pastagens degradadas e uso racional de fertilizantes sintéticos. Essas ações estão alinhadas às diretrizes do Plano ABC+, que promove práticas de baixa emissão de carbono na agropecuária, visando à redução das emissões e ao aumento da resiliência dos sistemas produtivos frente às mudanças climáticas.

Outro ponto relevante é que algumas atividades desenvolvidas na propriedade, como a floresta nativa e os cultivos agrícolas, apresentam potencial para atuar como sumidouros de carbono, contribuindo para a remoção de GEE da atmosfera. No entanto, para avaliar com precisão o saldo entre emissões e remoções, torna-se necessário realizar uma análise detalhada

do sequestro de carbono nas áreas de floresta e as áreas produtivas, com o objetivo de estabelecer o balanço líquido de emissões da propriedade. Tal análise permitiria compreender se a propriedade atua como uma fonte ou um sumidouro líquido de carbono, fornecendo subsídios técnicos para ações de mitigação mais direcionadas e eficazes.

Adicionalmente, destaca-se a importância do apoio de instituições como a Emater, Senar e outras entidades de assistência técnica e extensão rural, que desempenham papel fundamental na disseminação de tecnologias sustentáveis e na capacitação de produtores para a adoção de práticas de baixa emissão. O fortalecimento dessas parcerias é essencial para ampliar o alcance das ações mitigadoras e promover uma transição efetiva para sistemas agropecuários mais sustentáveis.

Por fim, recomenda-se a elaboração de novos estudos que envolvam outras propriedades de agricultura familiar, a fim de compreender melhor os padrões de emissão e as possibilidades de mitigação em diferentes contextos produtivos. Essa ampliação contribuirá para o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes e para a construção de uma agropecuária brasileira mais alinhada aos compromissos ambientais globais.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI). Projeto BRA/16/G31. *Relatório de Referência: Setor Agropecuária Subsetor Fermentação Entérica*. Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Brasília, 2020a. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em: 12 dez. 2024.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI). Projeto BRA/16/G31. *Relatório de Referência: Setor Agropecuária Subsetores Cultivo de Arroz*. Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Brasília, 2020b. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em: 12 de dez. 2024.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI). Projeto BRA/16/G31 *Relatório de Referência: Setor Agropecuária Subsetores Queima de Resíduos Agrícolas*. Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Brasília, 2020c. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em: 05 jan. de 2025.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI). Projeto BRA/16/G31 *Relatório de Referência: Setor Agropecuária Subsetores Solos Manejados, Calagem e Aplicação de Ureia*. Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Brasília, 2020d. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em: 05 jan. de 2025.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI). Projeto BRA/16/G31 *Relatório de Referência: Setor Agropecuária Subsetor Manejo de Dejetos*. Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Brasília, 2020e. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>. Acesso em 25 nov. de 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. *Resultados do Inventário Nacional por Unidade Federativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa*. Edição 1.1. Brasília: MCTI, 2022. Disponível em: <https://repositorio.mcti.gov.br/handle/mctic/4967>. Acesso em: 01 jan. 2025.

CENAMO, M. *Mudanças Climáticas, o Protocolo de Quioto e Mercado de Carbono*. CEPEA. Fevereiro, 2004. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/cenamo_mc.pdf. Acesso em: 06 mar. De 2025.

Cerri, C. C.; Raucci, G. S.; Moreira, C. S.; Frazão, L. A. Como mitigar emissão de gases pela adubação na cafeicultura. *Visão Agrícola*, n. 12, p. 82-84, jan./jul. 2013. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/va12-fertilidade-e-nutricao04.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2025.

CERRI, C. E.P; ABBRUZZINI, T. F; CARVALHO, J. L. N; CHERUBIN, M. R; FRAZÃO, L. A; MAIA, S. M. F; IRA, D. M. S. *Estratégias de mitigação e adaptação climática no setor agropecuário brasileiro*. Ciência e Cultura. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v76n3/v76n3a05.pdf>. Acesso em 18 de abri. de 2025.

CNI - Confederação Nacional da Indústria. *Acordo de Paris : handbook – artigo 6*. Confederação Nacional da Indústria. – Brasília : CNI, 2023. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/84/eb/84eb3364-d7ad-4ef7-b8ee-2f86912c5504/acordo_de_paris_-_artigo_6_interativo.pdf. Acesso em 06 fev. de 2025.

Conceição, J. C. P. R. *Principais Conquistas do Plano ABC e Desafios do Plano ABC+*. Nota Técnica. IPEA. Novembro de 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11579/1/NT_36_Dirur_Principais.pdf. Acesso em: 25 de fev de 2025.

Dong Z, Zhu B, Zeng Z. The influence of N-fertilization regimes on N₂O emissions and denitrification in rain-fed cropland during the rainy season. *Environ Sci Process Impacts*. 2014 Nov;16(11):2545-53. doi: 10.1039/c4em00185k. PMID: 25220444.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). *Pequenos agricultores familiares produzem mais de um terço dos alimentos no mundo*. FAO no Brasil. Abri, 2021 Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/en/c/1397857/>. Acesso em: 21 abr. 2025.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). *Conservation Agriculture*. Rome, Italy, 2022. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/024e17be-9fad-4556-be94-a8e2f229023d/content>. Acesso em: 21 abr. 2025.

FORTINI, R. M. *Um novo retrato da agricultura familiar do estado de Minas Gerais: a partir dos dados do censo agropecuário 2017*. Viçosa, Minas Gerais: IPPDS, UFV, 2021. Disponível em: <https://bibliotecasemiarios.ufv.br/handle/123456789/421>. Acesso em 05 de mar. de 2025.

FREITAS, C. *Mudanças do clima: breve histórico das conferências e análise de como o setor industrial químico pode auxiliar o Brasil a atender suas metas de redução de emissão de gases de efeito estufa*. *Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente (ENGEMA)*. Dezembro, 2016. Disponível em: <https://engemasp.submissao.com.br/18/anais/arquivos/118.pdf>. Acesso em: 02 fev. de 2025.

GENRO, T. C. M.; LARA, D. M.; LAMPERT, V do N.. *Análise das emissões de metano entérico do rebanho de bovinos de corte do Rio Grande do Sul*. Bagé, RS: Embrapa Pecuária Sul, nov. 2023. (Comunicado Técnico, n. 109). ISSN 1982-5382. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1158126/1/CT-109-Online.pdf>. Acesso em 20 de jun de 2025.

GOMES, Lucas C.; CARDOSO, Irene M. *Papel da agricultura familiar no sequestro de carbono e na adaptação às mudanças climáticas*. Ciência e Cultura. vol. 73, n.1, São Paulo, Jan./Mar.2021. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252021000100008#:~:text=A%20comercializa%C3%A7%C3%A3o%20dos%20produtos%20da,e%20no%20Programa%20Nacional%20de. Acesso em: 06 jan. 2025.

GRANZIERA, M. L.M.; REI, F. *O futuro do regime internacional das mudanças climáticas: aspectos jurídicos e institucionais*. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Fernando_Rei/publication/286371324_O_Futuro_do_Re

gime_Internacional_de_Mudancas_Climaticas/links/5668240308ae34c89a04dc12.pdf#page=17. Acesso em: 02 fev. de 2025.

Gundersen, P., Thybring, EE, Nord-Larsen, T. *et al.* Sumidouros de carbono em florestas antigas são superestimados. *Nature* 591, E21–E23 (2021). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03266-z>. Acesso em 07 de jul. 2025.

Hristov, A. N., Oh, J., Firkins, J. L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., ... & Tricarico, J. M. (2013). Special topics — Mitigation of methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, 91(11), 5045–5065. Disponível em: <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6583>. Acesso em: 06 de ago. 2025.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *AgroComparador: mapas interativos da produção agropecuária brasileira*. 2017b. Disponível em: <https://mapasinterativos.ibge.gov.br/agrocompara/>. Acesso em: 5 jul. 2025.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Agro 2017: população ocupada nos estabelecimentos agropecuários cai 8,8%*. Agência IBGE Notícias. Editora: IBGE, [s.l.], 2019. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/25789-censo-agro-2017-populacao-ocupada-nos-estabelecimentos-agropecuários-cai-8-8>. Acesso em: 6 out. 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Cidades e Estados*. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/caputira.html>. Acesso em: 26 de mai. 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção agropecuária em Minas Gerais*. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/mg>. Acesso em: 01 jan. 2025.

In: MELO, R. F. de; VOLTOLINI, T. V. (Ed.). *Agricultura familiar dependente de chuva no Semiárido*. Brasília, DF, Embrapa, 2019. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1114220/1/Agriculturafamiliardependentedechuvanosemiarido2019.pdf>. Acesso em: 02 de mar. de 2025.

INCRA. *Módulo Fiscal*. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/incra/pt-br/assuntos/governanca-fundiaria/modulo-fiscal>. Acesso em: 22 set. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Resultados do Censo Agro 2017*. 2017a. Disponível em: https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/pecuaria.html. Acesso em: 10 jun. 2025.

Instituto de Energia e Meio Ambiente. SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. *Análise das Emissões de Gases de Efeito Estufa: E suas Implicações para Metas Climáticas do Brasil 1970 – 2023*. Relatório Analítico. São Paulo: IEMA, 2024. Disponível em: <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 10: Emissions from Livestock and Manure Management*. IGES,

Kanagawa, Japão, 2006a. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_10_Ch10_Livestock.pdf. Acesso em: 11 jul. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 11: N₂O Emissions from Managed Soils, And CO₂ Emissions from lime and Urea Application*. IGES, Kanagawa, Japão, 2006a. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_10_Ch10_Livestock.pdf. Acesso em: 11 jul. 2025.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). 2019 *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. v. 4: Agriculture, Florestry and Other Land Use. C. 1, Introduction. Japan, 2019a. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch01_Introduction.pdf. Acesso em: 12 mar. de 2025.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). 2019 *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. v. 4: Agriculture, Florestry and Other Land Use. C. 10, Emissions From Livertock and Manure Management, 2019b. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch10_Livestock.pdf. Acesso em: 12 mar. de 2025.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). 2019 *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. v. 4: Agriculture, Florestry and Other Land Use. C. 11, N₂O Emissions from Managed Soils, and CO₂ Emissions from Lime and Urea Application, 2019c. Disponível em https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch11_Soils_N2O_CO2.pdf. Acesso em: 12 mar. de 2025.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). 2019 *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. v. 4: Agriculture, Florestry and Other Land Use. C. 5, Cropland, 2019d. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch05_Cropland.pdf. Acesso em: 12 mar. de 2025.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *About the IPCC*. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/about/>. Acesso em: 20 abr. 2025.

MAPBIOMAS BRASIL. *Códigos de legenda – uso e cobertura da terra* [recurso online]. 2025. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/codigos-de-legenda/> . Acesso em: 06 jan. 2025.

MINAS GERAIS. Assembleia Legislativa do Estado de Minas Gerais. Projeto de Lei nº 1.685, de 2015. Dispõe sobre a eliminação gradual do uso de fogo em plantação de cana-de-açúcar.

Belo Horizonte: ALMG, 2015. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/atividade-parlamentar/projetos-de-lei/texto/?tipo=PL&num=1685&ano=2015>. Acesso em: 22 set. 2025.

Monteiro, M. B. *Poluição Atmosférica na Indústria de Fertilizantes: Identificação das Fontes e Tecnologias de Controle. Monografia em Engenharia Química. UFRJ, 2023.* Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/20171/1/MBMonteiro.pdf>. Acesso em 22 set. 2025.

Moraes, G. J. Biomassa Arbórea e Carbono em Áreas de Restauração da Mata Atlântica. Botucatu, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/eb959111-d1b0-4414-a3d9-8250a087c69b/content>. Acesso em: 11 de jul. 2025.

MOREIRA, H. M, M.,; GIOMETTI, A. L. B.. *Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de projetos em energia limpa.* Scielo Brasil. Abril de 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cint/a/9RkZZcmTbc6mm8wRHHc5j3Q/#:~:text=O%20artigo%2012%20do%20Protocolo,que%20possibilitam%20a%20sua%20operacionaliza%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 05 de fev. de 2025.

Neto, C. R; Silva, F. A. C; Araújo, L. V. *Qual é a participação da agricultura familiar na produção de alimentos no Brasil e em Rondônia?*. Portal Embrapa, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/55609579/artigo---qual-e-a-participacao-da-agricultura-familiar-na-producao-de-alimentos-no-brasil-e-em-rondonia>. Acesso em: 9 jun. 2025.

ONU Brasil. O que são as mudanças climáticas? Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/175180-o-que-s%C3%A3o-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas>

Paciullo, D.S.C.; Pires, M.F.A; Aroeira L.J.M. ; Morenz M.J.F.; Maurício, R.M; Gomide, C.A.M.; Silveira, S.R. Sward characteristics and performance of dairy cows in organic grass-legume pastures shaded by tropical trees. *ScienceDirect*. Volume 8, Issue 8, 2014, Pages 1264-1271. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731114000767>. Acesso em: 5 de jul. 2025.

PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. *Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção.* Rio de Janeiro: ABES. 2009 Disponível em: http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosab5_tema_2.pdf. Acesso em 13 de abril de 2025.

REIS, A. R.; Furlani, E. J.; Buzetti, S.; Andreotti, M. *Diagnóstico da exigência do cafeeiro em nitrogênio pela utilização do medidor portátil de clorofila.* Bragantia, Campinas, v. 65, n. 1, p. 145–155, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/TRMg3BzYn6fpRz4FVjMVddC/>. Acesso em: 1 jul. 2025.

Ribeiro, V.S.; Junior, G. G. O.; Aparecido, L. E. O; Figueiredo, F. C; Rezende, R. N.; Rezende, A. P. S; Brito, J. P. C. Sequestro do dióxido de carbono equivalente na biomassa de lavouras cafeeiras. *Anais do Simpósio de Iniciação Científica do IFSULDEMINAS*, v. 1, n. 1, p. 42-57, 2022. Disponível em: . Acesso em: 13 jul. 2025

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. *Plataforma SEEG: Metano por setor e estado brasileiro (1990–2023)*. 2023. Observatório do Clima. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br>. Acesso em: 1 jul. 2025.

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. *Desafios e oportunidades para redução das emissões de metano no Brasil*. Brasília. Observatório do Clima, 2022. Disponível em: <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/03/SEEG-METANO.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2025.

Segnini, A.; Milori, D. M. B. P.; Simões, M. L.; Silva, W. T. L.; Primavesi, O.; Neto, L. M. *Potencial de seqüestro de carbono em área de pastagem de Brachiaria decumbens*. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 30., 2005, Recife. Anais [...]. Brasília: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/48375/1/PROCIOP2007.00153.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2025.

SEMAD; IEF. *Resolução Conjunta SEMAD/IEF nº 2.988, de 24 de julho de 2020*. Estabelece os critérios de uso, monitoramento e controle do fogo na prática de atividade agropastoril, florestal ou fitossanitária. Belo Horizonte, MG: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável; Instituto Estadual de Florestas, 2020. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=52251>. Acesso em: 22 set. 2025.

SENE, G. A.; Assumpção, A. H. P. M.; Oliveira, G. B.; Bertoloni, A. V.; Andrade, W. R.; Trettel, T.; Lelis, A. L. J.; Tropaldi, C. B.; Silva, G. V.; Neto, R. P.; Junior, F. P.; Henrique, F. L.; Corte, R. R.; Oliveira, P. P. A.; Rodrigues, H. M. *Práticas estratégicas com vistas à mitigação dos gases do efeito estufa na produção de bovinos a pasto*. In: Rodrigues, P. H. M.; Araújo, C. S. S.; Pereira, A. S. C.; Gameiro, A. H.; Brunetto, Pospissil, C. A. G.; Ventura, R. V. *Novos Desafios da Pesquisa em Nutrição e Produção Animal*. São Paulo: Editora 5D, 2019. p. 268-294. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/337325398_Novos_Desafios_da_Pesquisa_em_Nutricao_e_Producao_Animal/link/5dd2830ea6fdcc7e138a8e46/download. Acesso em: 20 de jun. 2025.

Simon, P. L. *et al.* *Uso de dicianodiamida (DCD) na mitigação de emissões diretas de óxido nitroso de dejetos bovinos em pastagem no subtropical brasileiro*. 2015. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1024228/1/2015JosileiaCBCSUseDeDicianodiamida.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2025.

Souza, 2012. SOUZA, H.N. *et al.* Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry system. In: *Agriculture, Ecosystem and Environment*, v. 146, p. 179-196, 2012.

TALANOIA, 2023. *NDC brasileira com metas corrigidas para 2025 e 2030*. Nota Técnica 4. Série “NDC brasileira”. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: https://institutotalanoia.org/wp-content/uploads/2023/11/Diagramacao_Serie-NDC-brasileira-4.pdf. Acesso em 24 fev. de 2025.

Torres, A.; Pedrosa, J. F.; Moura, J. P. *Fundamentos de Implantação de Biodigestores em Propriedade Rurais*. Revistaea. 2012. Disponível em: <https://www.revistaea.org/pf.php?idartigo=1248>. Acesso em: 28 de jun. 2025.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. *How COPs are organized: Questions and answers*. 2024. Disponível em:

<https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/the-big-picture/what-are-united-nations-climate-change-conferences/how-cops-are-organized-questions-and-answers>. Acesso em: 20 abr. 2025.

Vallenge Consultoria, Projetos e obras. Prefeitura Municipal de Caputira. *Plano Municipal de Saneamento Básico de Caputira*: Produto 3: Diagnóstico Técnico - Participativo. Plano Municipal. 2014. Disponível em: <https://app.rios.org.br/index.php/s/LyjtkgmtcYQzPa5?dir=undefined&path=%2Fcaputira-mg&openfile=6930488>. Acesso em: 05 de jan de 2025.

Vandré, R.; Wulf, S. N₂O emissions from solid manure storage – Calculation of a national emission factor. 2013. Disponível em: file:///C:/Users/Larissa/Downloads/dmartini,+LT_2013_1_038-042_en.pdf. (N₂O emissions from solid manure storage – Calculation of a national emission facto). EnviromEnt EnginEering. /disponível em: <https://www.agricultural-engineering.eu/landtechnik/article/download/2013-68-1-038-042/2013-68-1-038-042-en-pdf/>. Acesso em 15 de jun. de 2025.

Velásquez, A. V.; Martins, C. M. M. R.; Pacheco, P.; Fukushima, R. S. *Comparative study of some analytical methods to quantify lignin concentration in tropical grasses*. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, Seul, v. 32, n. 11, p. 1686-1694, nov. 2019. DOI: 10.5713/ajas.17.0450. PMCID: PMC6817777. Acesso em: 18 jun. 2025.

WRI Brasil. Como funciona o pagamento por serviços ambientais: quem protege e restaura florestas. *WRI Brasil*, 4 jan. 2021. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/como-funciona-o-pagamento-por-servicos-ambientais-quem-protege-e-restaura-florestas>. Acesso em: 13 jul. 2025.