



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

ANÁLISE DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA
EM PROPRIEDADES LEITEIRAS POR MEIO DA
FERRAMENTA *COOL FARM TOOL* (CFT)

Autora: Thaynara Fontana de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Ferenc Istvan Bánkuti

MARINGÁ

Julho – 2025

THAYNARA FONTANA DE OLIVEIRA

ANÁLISE DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA
EM PROPRIEDADES LEITEIRAS POR MEIO DA
FERRAMENTA *COOL FARM TOOL* (CFT)

Autora: Thaynara Fontana de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Ferenc Istvan Bánkuti

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM ZOOTECNIA, no Programa de Pós-Graduação em Zootecnia da Universidade Estadual de Maringá - Área de Concentração Produção Animal/Gestão da produção

Maringá - PR

Julho – 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

O48a

Oliveira, Thaynara Fontana de

Análise de emissões de gases de efeito estufa em propriedades leiteiras por meio da ferramenta *Cool Farm Tool* (CFT) / Thaynara Fontana de Oliveira. -- Maringá, PR, 2025. xiii, 96 f. : il. color., tabs., mapas

Orientador: Prof. Dr. Ferenc Istvan Bánkuti.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, 2025.

1. Aquecimento global. 2. Sustentabilidade. 3. Pecuária leiteira. 4. Gases de efeito estufa - Propriedades rurais. 5. Ferramentas de avaliação - Gases de efeito estufa. I. Bánkuti, Ferenc Istvan, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Zootecnia. III. Título.

CDD 23.ed. 636.2142

ANÁLISE DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA
EM PROPRIEDADES LEITEIRAS POR MEIO DA
FERRAMENTA *COOL FARM TOOL* (CFT)

Autora: Thaynara Fontana de Oliveira
Orientador: Prof. Dr. Ferenc Istvan Bánkuti

TITULAÇÃO: Mestre em Zootecnia - Área de Concentração Produção
Animal

APROVADA em ____ de _____ 2025.

Prof. Dr. Ferenc Istvan Bánkuti

Prof. Dr. Ricardo Souza
Vasconcellos

Prof. Dr. Tiago Teixeira da Silva
Siqueira

“O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são”.

(Aristóteles)

DEDICATÓRIA

Aos meus avós Antônio (*in memoriam*) e Ana, e minhas companheiras caninas Maia (*in memoriam*) e Glória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e Nossa Senhora de Fátima por me guiarem e concederem forças para que eu chegasse até aqui e alcance os meus objetivos.

À minha mãe, Alexandra e meus avós, Antônio (*in memoriam*) e Ana, por debaixo de muito sol e sacrifícios, possibilitaram conquistar meus sonhos à sombra. Obrigada por estarem sempre comigo. Amo e honro vocês com tudo que há em mim.

À Glória Mariana, minha companheira canina fiel e inseparável. Obrigada pela companhia até tarde escrevendo este trabalho, e por me ajudar em períodos sombrios. Te amo eternamente.

Ao meu tio, Alan, e minha madrinha, Rosislene, que sempre encorajaram meus estudos e me auxiliaram em todo possível. Em especial à minha dinda, que sempre atuou como minha coorientadora em todos os trabalhos acadêmicos e fez-se presente em todas as etapas de minha vida, especialmente nos momentos que mais precisei. Amo vocês.

Ao meu orientador, prof. Dr. Ferenc Istvan Bánkuti pela paciência, respeito, empatia e suporte que me concedeu desde o primeiro momento. Que todos os orientadores fossem metade do que o senhor é. Serei infinitamente grata por tudo.

À minha psicóloga, Nayra Romário, por ter segurado minha mão e me guiado através de momentos muito difíceis. Obrigada por seu apoio, sabedoria, paciência e cuidado comigo.

Às minhas amigas Ariane Mendes, Anna Beatriz Martins, Eduarda Voltarelli, Eloá Bosso, Jéssica Ferracini, Julia Manfroi, Maria Clara Teixeira e Rafaela Molina por fazerem parte da minha vida e dividirem as tristezas e alegrias. Vocês me inspiram, acolhem e juntas crescemos e ficamos mais fortes.

Ao Rafael Ceolim, pela coleta de dados, por sanar minhas dúvidas e auxiliar na análise dos resultados. Também aos produtores participantes desta pesquisa, por disporem de seu tempo e dados produtivos em prol da ciência.

Aos amigos feitos no PPZ e ao grupo GISPA e seus membros, pelo suporte e trocas. Em especial às minhas “irmãs”, Aline Rezende e Millana Latchuk, pelo companheirismo, apoio e cumplicidade ao longo destes dois anos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos.

BIOGRAFIA DO AUTOR

THAYNARA FONTANA DE OLIVEIRA, filha de Alexandra Cristina Fontana, nasceu em Apucarana, Paraná, no dia 7 de outubro de 1997. No ano de 2018 iniciou a graduação em Zootecnia pela Universidade Estadual de Londrina, formando-se em 2023. Por cinco anos atuou em grupos de pesquisa, eventos, e participou do Programa de Educação Tutorial (PET) – Zootecnia por três anos, e foi bolsista MEC/SESU. Em 2022, ao iniciar os estudos para a realização do Trabalho de Conclusão de Curso, interessou-se pela área da sustentabilidade na agropecuária e nos Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA). Após concluída a graduação, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Zootecnia (PPZ), na Universidade Estadual de Maringá, onde realizou sua pesquisa sobre emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) em propriedades leiteiras.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS – CAPÍTULOS I E II.....	viii
LISTA DE FIGURAS – CAPÍTULOS I E II.....	ix
LISTA DE QUADROS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
ANEXO	xiii
CAPÍTULO I	1
REVISÃO DE LITERATURA	1
1 INTRODUÇÃO	2
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1 Contexto Histórico	6
2.2 Efeito Estufa, Aquecimento Global e seus impactos	10
2.3 Agropecuária e Mudanças Climáticas	16
2.4 Relevância da Agropecuária Brasileira	20
2.5 O Leite e a Cadeia Leiteira	22
2.5.1 Cadeia Leiteira Paranaense e Paulista	23
3 REFERÊNCIAS	26
4 OBJETIVOS	47
CAPÍTULO II	48
EMISSIONES E CARACTERIZAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA - GEE EM PROPRIEDADES LEITEIRAS DOS ESTADOS DO PARANÁ E SÃO PAULO, UTILIZANDO A FERRAMENTA <i>COOL FARM TOOL</i> – CFT	48
RESUMO	49
ABSTRACT	50
1. INTRODUÇÃO	51
2. MATERIAL E MÉTODOS	53

2.1 <i>Cool Farm Tool</i> e Outras Ferramentas para Avaliação de GEE	53
2.2 Seleção das Propriedades	59
2.3 Inserção de dados, Análises e Comparações entre as Propriedades	59
3. RESULTADOS	61
3.1 Caracterização geral das propriedades e emissões	61
3.2 Análise por indicadores	66
3.2.1 Pastejo	66
3.2.2 Adubação de Pastagem	67
3.2.3 Alimentação	68
3.2.4 Fermentação Entérica	69
3.2.5 Manejo de Dejetos	70
3.2.6 Energia e processamento	71
3.2.7 Transporte	72
3.3 Análises Comparadas.....	74
3.3.1 Análise Comparativa P2 e P3	74
3.3.2 Análise Comparativa de P2, P3 e P10	74
4. DISCUSSÃO	75
4.1 Produção de leite e emissões.....	75
4.2 Alimentação, pastejo e emissões.....	76
4.3 Análise holística das emissões	79
4.4 Manejo de esterco e emissões.....	80
4.5 Raça, fisiologia, teor de gordura no leite e emissões	81
4.6 Contribuição dos indicadores “Energia e Processamento” e “Transporte”	82

5 CONCLUSÃO	83
CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
6 REFERÊNCIAS	84
ANEXO - Anexo Único	96

LISTA DE TABELAS

LISTA DE TABELAS – CAPÍTULO I

Tabela 1 – Variação nas concentrações dos Gases de Efeito Estufa (GEEs) afetados por atividade antrópica.....	8
--	---

Tabela 2 – Substâncias que destroem a Camada de Ozônio e a atual conjuntura no Brasil.....	13
---	----

LISTA DE TABELAS – CAPÍTULO II

Tabela 1 - Emissões totais (kg CO ₂ e) e corrigidas (kg CO ₂ e/kg FPCM)	63
--	----

Tabela 2 - Valores de emissões de GEE acumuladas, em quilogramas, para P4 e P17.....	64
---	----

Tabela 3 - Emissões totais, em CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ e para leite produzido e corrigido para gordura e proteína para o indicador Pastejo.....	67
--	----

Tabela 4 - Emissões totais, em CO ₂ e N ₂ O, para leite produzido e corrigido para gordura e proteína para o indicador Adubação de Pastagem.....	68
---	----

Tabela 5 – Emissões totais, em CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ e para leite produzido e corrigido para gordura e proteína para o indicador Alimentação.....	69
--	----

Tabela 6 - Emissões totais, em CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ e para leite produzido e corrigido para gordura e proteína para o indicador Fermentação Entérica.....	70
---	----

Tabela 7 - Emissões totais, em CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ e para leite produzido e corrigido para gordura e proteína para o indicador Manejo de Dejetos.....	71
--	----

Tabela 8 - Emissões totais, em CO₂, N₂O, CH₄ e para leite produzido e corrigido para gordura e proteína para a variável Energia e Processamento.....72

Tabela 9 - Emissões totais, em CO₂, N₂O, CH₄ e para leite produzido e corrigido para gordura e proteína para a variável Transporte.....73

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS – CAPÍTULO I

Figura 1 - Concentração atmosférica dos 5 principais gases do efeito estufa (CO₂, CH₄, N₂O, CFC-12 e CFC-11), de 1979 até a atualidade.....7

Figura 2 - Concentrações dos GEEs de 1850 até 2019.....8

Figura 3 – Temperatura da superfície do planeta de 1850 a 2020.....9

Figura 4 – Anomalias de temperatura oceânica e terrestre globais.....15

Figura 5 – Mudanças ocorridas e previstas no pH do oceano.....16

Figura 6 – Emissões, por setor, dos gases de efeito estufa no Brasil em 2020.....18

Figura 7 – Valor da produção (mil reais) de leite no estado do Paraná em 2023.....25

Figura 8 – Valor da produção (mil reais) de leite no estado de São Paulo em 2023.....25

Figura 9 – 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.....26

LISTA DE FIGURAS – CAPÍTULO II

Figura 1 – Layout da aba Leite na ferramenta *Cool Farm Tool*.....55

Figura 2 – Layout da aba Rebanho na ferramenta *Cool Farm Tool*.....55

Figura 3 – *Layout* da aba Pastagem na ferramenta *Cool Farm Tool*56

Figura 4 – *Layout* da aba Alimentação na ferramenta *Cool Farm Tool*, para CMS conhecida.....56

Figura 5 – <i>Layout</i> da aba Alimentação na ferramenta <i>Cool Farm Tool</i> , para alimentação média do rebanho.....	57
Figura 6 – <i>Layout</i> da aba Dejetos na ferramenta <i>Cool Farm Tool</i>	57
Figura 7 – <i>Layout</i> da aba Energia e Processamento na ferramenta <i>Cool Farm Tool</i>	58
Figura 8 – <i>Layout</i> da aba Transporte na ferramenta <i>Cool Farm Tool</i>	58
Figura 9 – Volume de produção de leite nas propriedades analisadas.....	62
Figura 10 – Emissão total, em kg CO ₂ e (*100.000) e em FPCM (kg CO ₂ e/kg FPCM) de P17 e P4.....	63
Figura 11 – Comparações das emissões em FPCM (kg CO ₂ e/kg FPCM) de P5 e P12 e P13 e P18.....	65
Figura 12 – Emissão em FPCM (kg CO ₂ /kg FPCM) e teor de gordura de P2 e P14....	65
Figura 13 – Emissão total (kg CO ₂ e) e em FPCM (kg CO ₂ e/kg FPCM) para P1, P2, P3 e P16.....	66
Figura 14 - Teores (%) de proteína e gordura dos leites produzidos por P3 e P10.....	66
Figura 15 - Nível (%) de contribuição dos GEE, em CO ₂ e, nas emissões totais.....	73
Figura 16 - Emissões totais (kg CO ₂ e) comparadas entre P2 e P3.....	74
Figura 17 - Emissões (kg CO ₂ e/kg FPCM) por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (FPCM) para 3 propriedades com algumas similaridades.....	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Gases de Efeito Estufa (GEEs) e as fontes emissoras associadas à agropecuária.....	17
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três dimensões
AC	Acesso ao pasto
ACV	Análise de Ciclo de Vida
AFOLU	Agricultura, Florestamento e Outros Usos da Terra
AGV	Ácidos graxos voláteis
C	Carbono
CCl ₃ F	Tricloromonofluormetano
CCl ₂ F ₂	Diclorofluormetano
CFCs	Clorofluorcarbonetos
CFT	<i>Cool Farm Tool</i>
CH ₄	Metano
CMS	Consumo de matéria seca
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPS	Consumo e Produção Sustentável
CTC	Tetracloroeto de carbono
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
FDN	Fibra detergente neutro
FPCM	<i>Fat and Protein Corrected Milk</i>
GEE	Gás de Efeito Estufa
Gg CO ₂ eq	Gigagramas de dióxido de carbono equivalente
GHG	<i>Greenhouse Gas Protocol</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
H ⁺	Íon hidrogênio
HBCFCs	Hidrobromofluorcarbonos
HCFCs	Hidroclorofluorcarbonetos
HCO ₃ ⁻¹	Íons de bicarbonato
HDL	<i>High Density Lipoprotein</i>
HFCs	Hidrofluorcarbonetos

IA	Inteligência Artificial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MG	Minas Gerais
MS	Matéria seca
N	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido nitroso
O ₂	Oxigênio
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
PC	Pegada de carbono
PIB	Produto Interno Bruto
SC	Sistemas confinados
SDO	Substâncias Destruidoras de Ozônio
SIF	Selo de Inspeção Federal
SF ₆	Hexafluoreto de enxofre
TBCA	Tabela Brasileira de Composição de Alimentos
UNDESA	<i>United States Department of Economic and Social Affairs</i>
VBP	Valor Bruto de Produção
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
WRI	<i>World Resources Institute</i>

ANEXO

Anexo Único - Tipos de manejos de dejetos e suas especificações.....	96
---	----

CAPÍTULO I
REVISÃO DE LITERATURA

1 INTRODUÇÃO

O leite e seus derivados são as principais fontes de cálcio em uma dieta (FAO, 2023), além de os produtos lácteos apresentarem como a terceira maior fonte de proteínas e a quinta maior de energia, e, dentre demais fatores pessoais, leva seis bilhões de pessoas a consumirem regularmente essa categoria de produtos (GDP, 2018).

Apresentando a produção superior a 36 bilhões de litros em 2023, o Brasil destaca-se como o quarto maior produtor de leite do mundo, com o valor bruto de produção (VBP) de 15,16 bilhões de dólares em 2023 (FAO, 2023). Com base no censo agropecuário de 2017, são 1,176 milhões de estabelecimentos agropecuários que produziram leite de vaca - uma queda de 12,89% frente a 2006, quando a quantidade de produtores alcançou 1,350 milhões (IBGE, 2017).

As estimativas mais recentes (UNDESA, 2019) indicam que a população mundial alcançará os 8,5 bilhões em 2030, 9,7 bilhões em 2050, e ultrapassará os 10 bilhões de pessoas no ano de 2100. Esse aumento virá inevitavelmente acompanhado da ampliação da demanda por alimentos, com expectativa de aumento anual em 1,3% entre 2023 e 2032, a qual não acompanhará a projeção de aumento na produção, que será de apenas 1,1% no mesmo período (OECD; FAO, 2023).

Paralelamente à importância econômica e nutricional, a produção leiteira esbarra em questões ambientais. Segundo publicação mais recente das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil, promovida pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI, 2022a), o setor Agropecuário foi responsável, em 2020, por 28,5% das emissões de gases de efeito estufa (GEE), que corresponde a 477.670,5 gigagramas de dióxido de carbono equivalente (Gg CO₂eq) (MCTI, 2022a).

Dentro do setor, as emissões são decorrentes majoritariamente da produção de metano (CH₄), que é gerado durante a fermentação entérica, manejo de dejetos, cultivo de arroz e ao realizar a queima de resíduos agrícolas (MCTI, 2022a). O setor Agropecuário conta com sete subsetores e, dentre eles, o subsetor de maior contribuição em 2020 foi o subsetor “fermentação entérica”, que foi responsável por 57% das emissões do setor em que se insere. Este subsetor compreende as emissões de CH₄, o qual é liberado ao longo do processo de fermentação entérica, ocorrido em animais ruminantes e não ruminantes, sendo influenciado pela espécie animal, quantidade e qualidade da nutrição fornecida, bem como particularidades relacionadas à digestibilidade dos alimentos (MCTI, 2022a).

Visando a análise ambiental há alguns métodos, diretos e indiretos, passíveis de realizarem de mensuração e estimativas da emissão dos GEE e de impactos ambientais. As metodologias diretas realizam a mensuração *in situ* dos gases, enquanto as indiretas (também denominadas de modelos estatísticos), promovem a estimativa dos GEEs através de dados disponíveis, como é o caso das calculadoras de emissões e a Análise de Ciclo de Vida (ACV) (Costa *et al.*, 2006; ISO 14040, 2006; Kuyah *et al.*, 2016; Sales *et al.*, 2025). Alguns dos métodos diretos são os analisadores de infravermelho, técnicas micrometeorológicas e cromatografia gasosa (Costa *et al.*, 2006; Borhan; Khanaum, 2022; GHG Protocol, 2022). De acordo com Costa *et al.* (2006), em analisadores de infravermelho a mensuração é feita com base na capacidade do CH₄, óxido nitroso (N₂O) e dióxido de carbono (CO₂) em absorverem a radiação eletromagnética na faixa do infravermelho sendo utilizado em alguns trabalhos para avaliar a concentração dos referidos gases no sistema (Schmithausen; Trimborn; Büscher, 2016; Shetty *et al.*, 2017; Lin *et al.*, 2019; Witkowska *et al.*, 2020; Shan *et al.*, 2025).

Como exemplo de analisadores de infravermelho tem câmaras de ar, que executam a medição através de um ajuste no teor de CO₂, contido no ar aprisionado dentro da câmara, em função de uma regressão parabólica no tempo, após o fechamento da câmara (Moitinho, 2017). A metodologia das câmaras é predominante na quantificação de gases em áreas agrícolas (Clough *et al.*, 2020; Mumu *et al.*, 2024), sendo utilizadas em trabalhos como os de Iamaguti *et al.* (2015), Souza (2017), Taylor *et al.* (2017), Xavier (2018), Silva *et al.* (2019), Barros Júnior *et al.* (2021) e Nugrahaeningtyas *et al.* (2023).

As técnicas micrometeorológicas avaliam as emissões de gases baseando-se em área de maior amplitude, reduzindo efeitos de heterogeneidade espacial, sendo pautadas na concepção de que o transporte de gases ocorre por turbulência atmosférica, o que movimenta o ar entre diferentes níveis (Mumu *et al.*, 2024). Como exemplo tem o Método de Covariância de Fluxos Turbulentos (do inglês “*Eddy Covariance*”) (McGinn, 2006; Wecking *et al.*, 2020; Cabral *et al.*, 2024; Eismann *et al.* 2024).

Já a cromatografia gasosa trata de um método de segregação de componentes de misturas a fim de obter informações sobre as composições e quantidades moleculares da amostra analisada (Blumberg, 2021), sendo tipicamente utilizada, assim como as análises em infravermelho, para quantificar a concentração de CH₄ (Hammond *et al.*,

2016; Schmithausen; Trimborn; Büscher, 2016; van Gastelen *et al.*, 2017; van Gastelen *et al.*, 2018; Amadori, 2019; Nugrahaeningtyas *et al.*, 2023).

Ao passo que técnicas como a cromatografia gasosa e as câmaras de fluxo de ar realizam medidas mais específicas (avaliam amostras de ar, por exemplo), metodologias como a ACV proporcionam uma visão holística dos aspectos ambientais e dos impactos potenciais de um produto ou serviço no decorrer de sua vida útil, contabilizando desde a matéria-prima, passando pela produção, até uso e descarte (Arvanitoyannis, 2008).

As calculadoras de emissão têm conquistado espaço significativo nas mensurações de GEEs em pesquisas, como observado nos trabalhos de Sykes *et al.* (2017), Vetter *et al.* (2018), Sukhoveeva (2021), Thumba; Lazarova-Molnar e Niloofar, 2022 e Olivo *et al.* (2024). A calculadora escolhida para a realização desse foi a *Cool Farm Tool* (CFT), uma ferramenta *online* de estimativa de GEE, biodiversidade e uso de água voltada para a agricultura e produção animal. Além da CFT, outros programas estão disponíveis para mensuração dos gases. A ferramenta *Greenhouse Gas Protocol* (GHG) é gratuita e disponibiliza além de uma calculadora online, uma planilha de Excel para que a mensuração seja feita (Assad *et al.*, 2024).

Há também o programa EX-ACT, desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (do inglês “*Food and Agriculture Organization of the United Nations*”, FAO) que também utiliza a planilha do Excel para realização dos cálculos, tal qual o programa CCAFS-MOT, desenvolvido pela Universidade de Aberdeen (MacSween e Feliciano, 2018). O programa SHAMBA analisa os dados por meio do *Python*, e foi concebido pela Universidade de Edimburgo (MacSween e Feliciano, 2018). A plataforma ALU, elaborada pela Universidade Estadual do Colorado, utiliza *website* próprio para os cálculos, mas requer submissão e avaliação de formulário para que seja concedido credencial de acesso ao *download* do programa (NREL, 2024).

Com exceção de CCAFS-MOT, EX-ACT e SHAMBA, os demais programas necessitam de cadastro; e apenas CCAFS-MOT e SHAMBA possuem maior facilidade de manipulação, enquanto os demais programas necessitam de maior conhecimento para serem utilizados (MacSween e Feliciano, 2018). Com base nas características de cada programa e no proposto para o desenvolvimento deste trabalho, a ferramenta CFT é a considerada mais propícia por não possuir custos, ser de fácil acesso e manipulação, além de todos os dados serem inseridos e armazenados online (CFT, 2024). Baseado no exposto, este trabalho tem por objetivo estimar as emissões de GEEs ocorridas em

propriedades leiteiras brasileiras, estabelecidas nos estados de Paraná e São Paulo, e analisar características que possam explicar menores emissões em determinadas propriedades.

Autores como Fuller (1969) e Miller e Spoolman (2018) comparam o planeta Terra a uma astronave. Esta astronave estaria em deslocamento contínuo, provida com ar, água e comida suficientes para a manutenção de seus passageiros, possuindo também um sistema de aproveitamento de energia solar e reciclagem de matéria (como as fontes renováveis) tão eficiente que existe mesmo com a entropia, fenômeno pelo qual os sistemas físicos perdem energia (Fuller, 1969).

Contudo, haveria progressivamente aumento no número de passageiros (em função do crescimento populacional) e a astronave não contaria com paradas para reabastecimento durante seu percurso. Fuller (1969) ainda compara a Terra (nossa “astronave”) a um carro. O autor diz que, para aqueles detentores de um automóvel é de pleno conhecimento que ele necessita de manutenção, reabastecimento e cuidados como um todo, tendo plena sabedoria de que se deve manter o veículo em boas condições ou este terá problemas e deixará de funcionar (Fuller, 1969).

Ele ainda destaca que os habitantes da Terra, os “passageiros da astronave”, não estariam visualizando a Terra como uma máquina cuidadosamente projetada e que, para funcionar adequadamente, necessita de compreensão e manutenção integrais (Fuller, 1969). O mesmo conceito é trazido por George Orwell já em 1937, que diz que o mundo seria uma jangada e que deveria haver um senso de cooperação para que todos contribuíssem e fossem contemplados com parcelas justas dos recursos disponíveis. Pautando-se no Consumo e Produção Sustentável (CPS), para que possamos continuar nossa trajetória na “astronave” e garantir que as futuras gerações também o façam, é necessário compreender e melhorar os sistemas de produção atual, juntamente com seus impactos (PNUMA, 2012).

Tendo esses contextos expostos, também se faz importante trazer à luz uma importante iniciativa da ONU, a Agenda 2030, na qual constam os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), os quais tem como meta a erradicação da fome, a proteção dos direitos humanos e a preservação do planeta até o ano de 2030 (ONU, 2015). Ainda, este trabalho se relaciona, especificamente, aos ODS 2, 12, 13, 14, 15 e 17. O ODS 2 destaca a importância de duplicar a produtividade agrícola e garantir sistemas de produção sustentáveis e resilientes (ONU, 2015). O ODS 12 trata da gestão eficiente dos recursos naturais, redução de resíduos, desperdício de alimentos e

incentivo à sustentabilidade empresarial, metas viáveis a partir do conhecimento das emissões de GEE nas propriedades (ONU, 2015). Já o ODS 13 aborda a adaptação e mitigação das mudanças climáticas, além de ressaltar a importância de incorporar a questão climática em políticas públicas e ampliar a educação sobre o tema (ONU, 2015).

O ODS 14, por sua vez, reforça a necessidade de conservar os recursos hídricos, fundamentais à agropecuária e aquicultura (ONU, 2015). O décimo quinto ODS foca na restauração de áreas degradadas, conservação do solo e biodiversidade (ONU, 2015). Por fim, o ODS 17 trata da cooperação internacional e da transferência de tecnologias sustentáveis para países em desenvolvimento (ONU, 2015) - exemplificado no uso da ferramenta “*Cool Farm Tool*”, desenvolvida em países desenvolvidos e aplicada neste trabalho, realizado em país em desenvolvimento, como suporte à gestão sustentável das propriedades rurais (ONU, 2015).

Dessa forma, é de suma importância o conhecimento detalhado da emissão de GEEs nas propriedades, além da caracterização da origem de cada emissão e quais gargalos nas emissões são passíveis de serem mitigados ou eliminados. Com os dados em mãos, é possível fornecer um retorno ao produtor, viabilizando a elaboração de estratégias de mitigação e práticas que tornem a produção mais sustentável. A relevância deste trabalho, portanto, baseia-se na urgente necessidade de mensurar e estimar as emissões de GEEs nas produções, com o foco específico desta pesquisa sendo a agropecuária e a produção de alimentos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONTEXTO HISTÓRICO

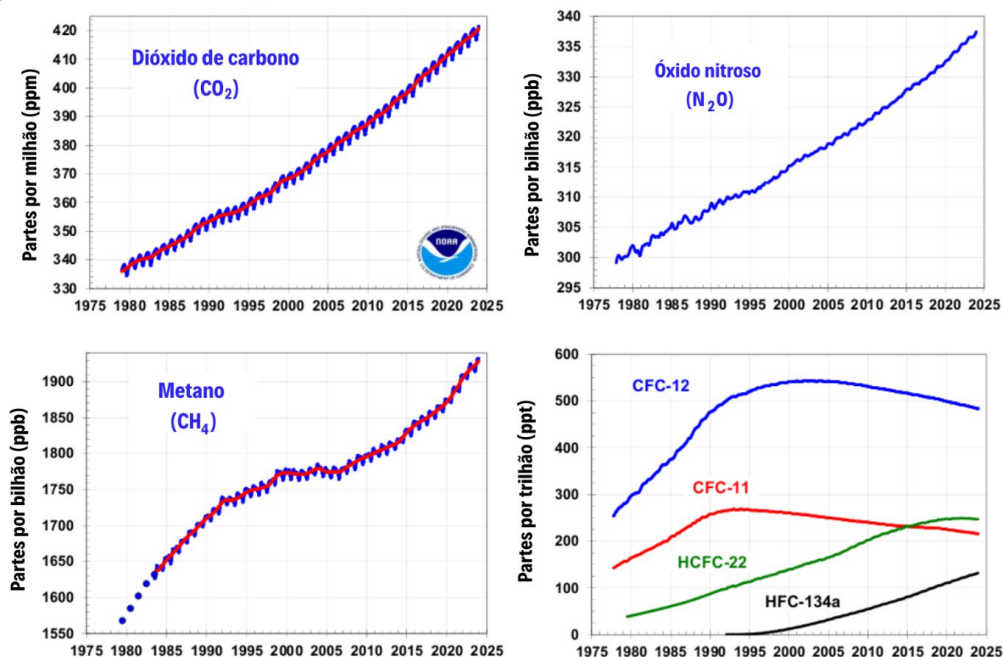
A Primeira Revolução Industrial, iniciada ao final do século XVII na Inglaterra, foi um importante marco na história para o desenvolvimento de tecnologias, (Rocha; Lima; Waldman, 2020). As inovações provenientes deste período possibilitaram o surgimento e aprimoramento contínuo de inovações, viabilizando o atendimento de necessidades e demandas crescentes da sociedade capitalista, que frequentemente busca por progresso, resoluções de problemáticas e maiores praticidades (Lima; Oliveira Neto, 2017). Ainda que tenha proporcionado inúmeros avanços, a Revolução Industrial viabilizou o início de grandiosas intervenções na natureza (Leal; Farias; Araujo, 2008),

a citar o desmatamento, o uso de combustíveis fósseis e a contaminação dos recursos ambientais (Silva; Crispim, 2011; Machado *et al.*, 2022).

Este momento histórico sofreu mais duas ocorrências ao longo do tempo, com a Segunda Revolução Industrial ocorrendo em 1870 e a Terceira Revolução Industrial na década de 1970, aproximadamente (Pasquini, 2020). Ainda que seu acontecimento contemple benefícios grandiosos como a máquina à vapor (Dathein, 2003), a Revolução Industrial em si foi um dos primeiros vetores de grandiosas intervenções humanas na natureza (Sodré; Silva; Monteiro, 2016; Pott; Estrela, 2017). À exemplo do motor à combustão criado na Segunda Revolução, que amplificou o uso de combustíveis fósseis, cuja consequência da queima impacta diretamente a atmosfera (Scwinzekel *et al.*, 2022).

Maslin (2004) salienta que, ainda que a temática sobre aquecimento global levante inúmeras discussões, um dos tópicos universalmente aceitos em razão de suas provas é que, desde o período industrial, os níveis de CO₂ têm demonstrado aumento. Atualmente sabe-se que a queima desses combustíveis contribui com 80% das emissões de GEEs, como CO₂ e metano (CH₄) (Almeida, 2023) que, atrelados à intensa industrialização, o desmatamento, práticas agropecuárias executadas de forma insustentável, e inúmeros outros acontecimentos, têm proporcionado o aumento dos GEEs na atmosfera (Figura 1) (Pinê, 2014).

Figura 1 - Concentração atmosférica dos 5 principais gases do efeito estufa (CO₂, CH₄, N₂O, CFC-12 e CFC-11), de 1979 até a atualidade.



Fonte: Adaptado de National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024a.

Previamente à invenção do motor à combustão, as emissões CO₂ eram estimadas a cerca de 280 partes por milhão (280 ppm) (Wilson; Law, 2010). Esse valor, como visualizado na Tabela 1, contava com aumento de 30,36% para o CO₂, de 149,29% para o CH₄, de 16,30% para o N₂O, de 268 vezes para CFC-11 e CFC-12, e por fim, de 4,2 vezes em SF₆ em 1998 (Houghton *et al.*, 2001).

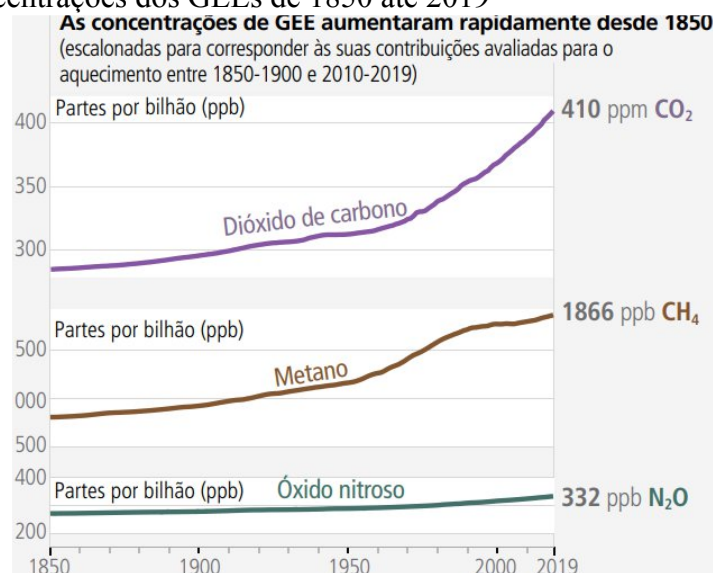
Tabela 1 - Variação nas concentrações dos Gases de Efeito Estufa (GEEs) afetados por atividade antrópica.

	Concentração Pré-Revolução Industrial	Concentração em 1998	Taxa de alteração na concentração
CO₂	cerca de 280 ppm ¹	365 ppm	1.5 ppm/ano
CH₄	cerca de 700 ppb ²	1745 ppb	7.0 ppb/ano
N₂O	cerca de 270 ppb	314 ppb	0.8 ppb/ano
CFC-11	0	268 ppt ³	-1.4 ppt/ano
CFC-12	0	268 ppt	4.4 ppt/ano
SF₆	0	4.2 ppt	0.24 ppt/ano

¹partes por milhão; ²partes por bilhão; ³partes por trilhão.

Fonte: Adaptado de Houghton *et al.*, 2001.

Figura 2 - Concentrações dos GEEs de 1850 até 2019



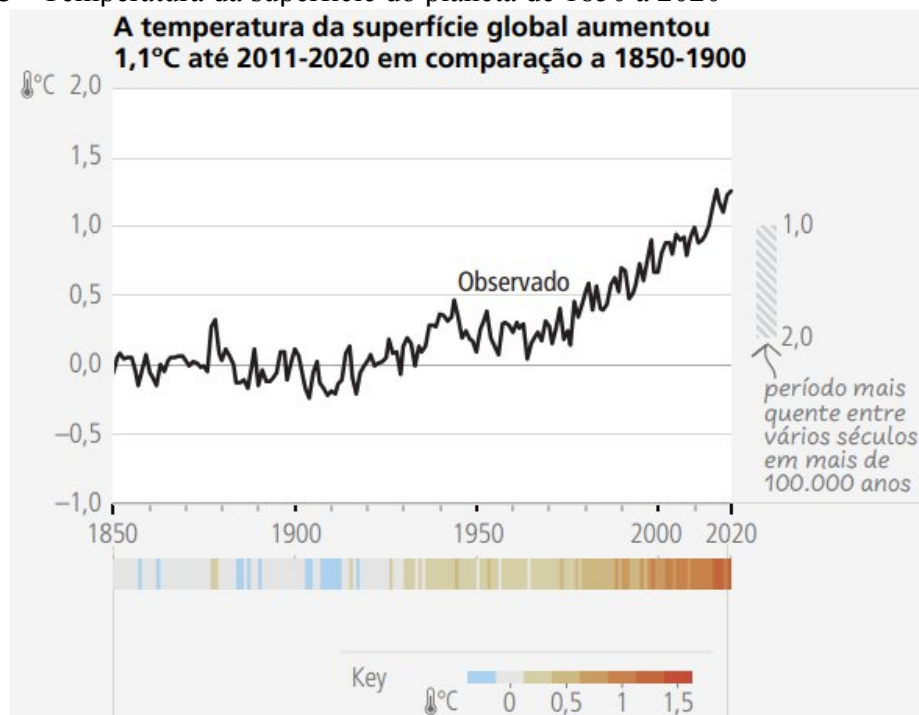
Fonte: IPCC, 2023.

De acordo com a crescente invenção de tecnologias e surgimento de demandas, as emissões de GEEs foram graduais ao longo dos anos. Conforme é possível verificar na Figura 2, em que as análises mais recentes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, do inglês “*Intergovernmental Panel on Climate*

Change”), nas quais este valor se encontrava perto dos 415 ppm de CO₂ no ano de 2021, menos de 300 anos depois (IPCC, 2023), revelando o aumento de aproximadamente 48% em 23 anos. O mesmo ocorre com o CH₄ (8,66%) e para N₂O (6,69%) (Houghton *et al.*, 2001; IPCC, 2023).

No século XIX, Arrhenius, baseado nos achados de Tyndall sobre o poder de absorção de calor do CO₂, realizou estimativas para a temperatura do planeta tendo em perspectiva que o gás duplicasse as concentrações. Os resultados apontaram um aumento de 5 a 6°C em 3 milênios (Wilson; Law, 2010). E de acordo com estimativas mais recentes, o aumento seria de 1,5° (Figura 3) entre 2030 e 2052 (IPCC, 2018). A taxa de aquecimento da temperatura do planeta nos últimos 50 anos, ao considerar os últimos 2 milênios, é a maior desde a década de 1970 (IPCC, 2023).

Figura 3 - Temperatura da superfície do planeta de 1850 a 2020



Fonte: IPCC, 2023.

Atualmente, os pesquisadores falam sobre a Quarta Revolução Industrial, uma vez que estão passando por um novo ciclo de desenvolvimento de tecnologias (Cardoso, 2016). Segundo Perasso (2016), a também chamada “Indústria 4.0”, tende à automatização completa das fábricas e segue um caminho de produção que não depende dos seres humanos. Dentre exemplos das novas tecnologias tem a Inteligência Artificial (IA), a robótica, biotecnologia, neurotecnologia e impressões em três dimensões (3D), por exemplo.

Trazendo para as porteiras, há a utilização de drones e recursos tecnológicos que permitem a avaliação da área plantada (Magalhães; Vendramini, 2018), máquinas capazes de pulverizar, colher e semear de forma autossuficiente (Bazzi; Schenatto; Sobjak, 2023). Além das ferramentas de identificação dos animais através de leitura eletrônica, distribuição automatizada de ração no cocho, mensuração do consumo de água e ração por meio de verificação automática, e *softwares* de gestão e formulação de dietas (David *et al.*, 2023). Esses são alguns dos exemplos utilizados pela agropecuária da Indústria 4.0, também conhecida como “Agricultura 4.0 ” ou “Agro 4.0” (Massruh; Leite, 2017).

2.2 EFEITO ESTUFA, AQUECIMENTO GLOBAL E OS IMPACTOS

O efeito estufa é o fenômeno natural responsável por viabilizar a vida na Terra, parte da energia recebida do Sol atravessa a atmosfera terrestre e parte é refletida pela Terra (Cassia *et al.*, 2018; IPCC, 2021a). Os GEEs são responsáveis por capturar uma fração desta energia refletida, fazendo com que a temperatura média da Terra alcance 15°C, contrastando com os -18°C existentes sem que o efeito estufa ocorresse (Mitchell, 1989; Tolentino; Rocha-Filho, 1998; WHO, 2010). Dentre os GEEs tem o ozônio (O₃) e vapor d'água (H₂O) (Mitchell, 1989; MCTI; BNDES, 1999), bem como os clorofluorcarbonetos (CFCs), hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs) e do hexafluoreto de enxofre (SF₆) (Tolentino; Rocha-Filho, 1998) – os principais GEE, por sua vez, são gás carbônico (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) (IPCC, 2021b; Jones *et al.*, 2023).

Entre esses gases, o CO₂ tem sido utilizado como referência, sendo este liberado pela queima de combustíveis fósseis (Estevam; Pavão; Assad, 2023), pelas queimadas de biomassa (desmatamento e pelo metabolismo e decomposição de materiais vegetais (Ciais *et al.*, 2013; Pereira, 2023), liberado durante o preparo convencional do solo, através da prática de calagem e por meio da queima de resíduos agrícolas (Assad *et al.*, 2019a); mas consumido através da fotossíntese por exemplo.

Considerando que o CO₂ obteve aumento aproximado de 123,5% entre 1980 e 2024 (NOAA, 2024a), o mesmo possui, como GEEs antropogênicos, a maior relevância no aquecimento global (CETESB, 2017; Pereira, 2023). Em função da relevância dentro dos GEEs, o CO₂ é utilizado como base para o cálculo do Potencial de Aquecimento Global (do inglês *Global Warming Potential*, GWP) de outros gases, a fim de calcular o

chamado Carbono Equivalente - comumente chamado de CO₂eq (MDIC, 2009; Assad *et al.*, 2019a) ou CO₂e (CETESB, 2017).

O GWP baseia-se na capacidade de retenção de calor e de consequente aquecimento do planeta de um GEE quando comparado ao CO₂, ou seja, quanto um determinado gás corresponde em CO₂ (MCTI, 2022b). O valor obtido para o GWP, dado em fator, é multiplicado pela massa do GEE, fornecendo um valor de massa equivalente em CO₂ (CO₂e) (ABRELPE, 2012; MCTI, 2022b). O IPCC, em relatórios, aborda valores para GWP 100 e 20. O GWP100 é tido como padrão internacional e refere-se à energia retida por um gás no período de um século, por sua vez o GWP20 compreende o período de 20 anos (Al Khourdajie *et al.*, 2022).

Para o CO₂ o GWP100 é 1; enquanto o metano apresenta um potencial médio de 28 (Al Khourdajie *et al.*, 2022). O CH₄ por sua vez, origina-se dos animais ruminantes e dejetos animais, do cultivo de arroz irrigado (Assad *et al.*, 2019a), da extração e utilização de combustíveis fósseis, e dos aterros e resíduos descartados (Ciais *et al.*, 2013). Em 2020, as emissões deste gás corresponderam a 406,47 milhões de toneladas de CO₂e, correspondendo a mais de 24% das emissões totais do ano, ficando atrás apenas do CO₂, com o valor de 1.081,88 milhões de toneladas de CO₂e, um valor responsável por 64,5% das emissões (MCTI, 2022a).

Em relação ao N₂O, este também é oriundo dos dejetos animais, da queima de resíduos advindos da agricultura, e ainda pelo uso de fertilizantes nitrogenados (Assad *et al.*, 2019a). As contribuições do óxido nitroso para as emissões brasileiras em 2020 foram bem abaixo dos dois outros gases citados, apresentando 179 milhões de toneladas produzidas, compreendendo a cerca de 10% das emissões totais (MCTI, 2022a). Seu potencial de aquecimento é de 273 (Al Khourdajie *et al.*, 2022). Tem o ozônio, que está relacionado com o bloqueio de uma fração da radiação ultravioleta do sol, compondo a conhecida Camada de Ozônio (Tolentino; Rocha-Filho, 1998). Sua presença pode ser positiva e negativa simultaneamente; uma vez que a existência na estratosfera é responsável pelo bloqueio da radiação prejudicial, mas o ozônio troposférico existe em decorrência dos poluentes, provocando problemas respiratórios, levando prejuízos à vida vegetal e aos tecidos (CETESB, 2014).

A camada de ozônio tem sofrido danos em função das Substâncias Destruidoras de Ozônio (SDO), os quais são químicos antropogênicos contendo cloro e bromo, por exemplo os CFCs e os hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs) (Prozonesp; CETESB; SMA, 2005). Em relação aos clorofluorcarbonetos, estes são gerados principalmente

através do setor de refrigeração (Tolentino; Rocha-Filho, 1998). Os CFCs de maior importância são o triclоромонofluormetano (CCl_3F) conhecido como CFC-11; e o diclorodifluormetano (CCl_2F_2), comumente chamado de CFC-12 que possui, em uma única molécula, um poder 10.000 vezes maior de captação das ondas longas que o CO_2 (Mitchell, 1989; Tolentino; Rocha-Filho, 1998).

Os hidroclorofluorcarbonetos, por sua vez, são distintos dos CFCs por possuírem átomos de hidrogênio no lugar de um ou mais átomos de cloro e/ou flúor. Apresentando menor potencial destruidor da camada de ozônio quando comparados com os HCFCs que, em função do hidrogênio, tornam as moléculas do composto menos estáveis. À exemplo de um HCFCs, tem o CH_2FCD_3 (HCFC-134a), cujo PGA é de 1.300 (FGV; GHG Protocol, 2022).

Considerando seu potencial destrutivo em relação à camada de ozônio, gases como os CFCs e os HCFCs foram gradualmente tendo o uso abolido a partir do Protocolo de Montreal (UN, 1987). O Protocolo é um acordo estabelecido em 1987, durante a Convenção de Viena para a Proteção da Camada de Ozônio, cujo objetivo pauta na regulação do uso e geração de inúmeras Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio (SDOs), como os CFCs – CFCL_3 , CF_2CL_3 , $\text{C}_2\text{F}_2\text{CL}_3$, $\text{C}_2\text{F}_4\text{CL}_2$, $\text{C}_2\text{F}_5\text{CL}$; e os halons CF_2BrCL , CF_3Br , $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$ (UN, 1987; MMA, 2022).

Os países que endossam o Protocolo passam a seguir um cronograma de redução dos referidos gases, com prazos para eliminação completa do uso das substâncias mencionadas – países desenvolvidos e em desenvolvimento possuem prazos distintos, tendo um prazo maior em relação aos desenvolvidos (UN, 1987; UNEP, 2020). Posteriormente, ao longo dos anos de ocorrência das Conferências das Partes, outros gases foram adicionados, como o tetracloreto de carbono (CCl_4) e o metilclorofórmio (1, 1, 1-tricloroetano) (UNEP, 2020), e os SDOs foram divididos em 7 famílias: CFCs, brometo de metila, tetracloreto de carbono (CTC), halons, hidrobromofluorcarbonos (HBFCs), HCFCs e metilclorofórmio (MMA, 2022). Em 2016, apesar de não serem nocivos à camada de ozônio, os hidrofluorcarbonetos (HFCs) foram adicionados às restrições do Protocolo através da Emenda de Kigali, em decorrência da contribuição para as mudanças climáticas (Kigali, 2018; MMA, 2022).

No Brasil, a adesão ao Protocolo de Montreal ocorreu através do Decreto nº 99.280, de 06 de junho de 1990 (Brasil, 1990). As SDOs citadas são oriundas tanto de produção quanto de consumo em setores de refrigeração, confecção de espumas, utilização na agricultura, desinfecção de itens e em laboratórios, além da presença das

SDOs em aerossóis, extintores de incêndio e solventes (MMA, 2016; MMA, 2022). A proibição das substâncias foi realizada através da resolução nº 267, de 14 de setembro de 2000, pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (CONAMA, 2000). A importação destas substâncias é proibida, com exceção dos halons, brometo de metila e HCFCs, os quais são apenas restritos; e os HFCs, cuja importação é permitida desde que a empresa esteja em acordo com a legislação ambiental (CONAMA, 2000; IBAMA, 2025). De acordo com o proposto, o Brasil realizou gradualmente a redução e eliminação das SDOs, como observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Substâncias que destroem a Camada de Ozônio e a atual conjuntura no Brasil.

SDOs	Situação no Brasil
Metilclorofórmio	Consumo eliminado em 2000
Halons	Proibida a importação em 2001
Brometo de metila	Uso agrícola eliminado em 2005
CTC ¹	Consumo eliminado em 2008
CFCs ²	Uso proibido em 2010
HBFCs ³	Substância não consumida no Brasil
HCFCs ⁴	Processo de redução; eliminação completa visada para 2040

¹Tetracloro de carbono; ² Clorofluorcarbonos; ³ Hidrobromofluorcarbonos; ⁴ Hidroclorofluorcarbonos.

Fonte: MMA, 2022.

A intensificação na concentração destes gases eleva a temperatura da Terra, provocando o aquecimento global (Costa Silva; Paula, 2009). O aquecimento global é o fenômeno em que a temperatura da superfície e do ambiente terrestre aumentam em função do incremento na concentração de GEEs (Maslin, 2004; EPA, 2009), e um dos principais causadores das mudanças climáticas (Oliveira; Silva; Henriques, 2009). As mudanças climáticas compreendem alterações detectáveis no clima, provocadas direta ou indiretamente por ações antrópicas, que modificam a atmosfera do planeta, sendo distinguíveis da simples variabilidade climática natural observada ao longo dos anos (UNFCCC, 1992; IPCC, 2023). Além das atividades antrópicas, estas alterações das variações na média e/ou na variabilidade das características do clima, as quais perseveram por décadas ou períodos maiores, podem ser provocadas por processos naturais; atores externos, como erupções vulcânicas ou ciclos solares; desenvolvendo alterações na composição da atmosfera (UNFCCC, 1992; IPCC, 2023).

Como resultado das alterações climáticas, o nível dos oceanos elevou entre 21 e 24 centímetros nos últimos 44 anos, tendo, em 2023, o aumento alcançado 10,14 centímetros acima dos valores encontrados em 1993 (Lindsey, 2023). Na China, estudo

realizado por Zhou e Yuan (2024) demonstra que o aquecimento global potencializou os eventos de precipitação extrema nas regiões oeste e central do país. O aquecimento global também, segundo o IPCC (2019), promoveu o encolhimento da criosfera, redução da cobertura de neve, queda na espessura do gelo marinho no Ártico, perda de massa e mantos de gelo e geleiras, e aumento da temperatura do *permafrost* - que se refere a solo, rocha ou material orgânico os quais são mantidos a 0°C ou menos por, no mínimo, dois anos consecutivos, e está mais atrelado à temperatura do que a existência de gelo (que pode não estar presente) (Harris *et al.*, 1988).

Em 2023 houve uma temperatura global superior a 1°C (Figura 4) acima da média do século XX (de 13,9°C), sendo considerado o ano mais quente desde o início das medições, em 1850 (IPCC, 2023; NASA; GISS, 2023; NOAA, 2024b). Em análise feita por Brkić (2023) ao longo de 43 anos, foi possível observar que o lago Vrana, na Croácia, apresentou aumento na temperatura média anual da superfície da água de 0,47°C na última década. Segundo o IPCC (2023), os oceanos também estão aquecendo, obtendo aumento médio de 0,88°C na temperatura, quando comparado ao período entre 1850-1900. O aquecimento e a acidificação possuem ainda efeitos negativos na produção aquícola, impactando a produção de alimentos (IPCC, 2023).

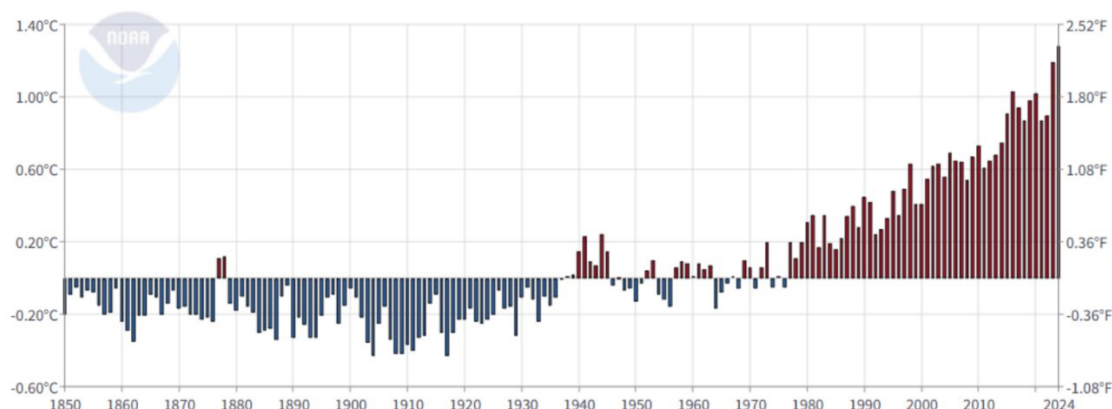
Segundo Onhinam (2022), frente à dependência direta das condições climáticas, o setor agrícola é altamente suscetível aos frutos das mudanças do clima. Estes serão demonstrados através da ocorrência e aumento na incidência de extremos climáticos como seca, altas temperaturas e chuvas intensas (IPCC, 2023); elevação da concentração de CO₂, da temperatura do ar e do solo (Cordeiro *et al.*, 2012); nos impactos severos na saúde em decorrência do aumento de epidemias, deterioração de ecossistemas de recifes corais e comprometimento de infraestrutura e da segurança física em função de inundações, deslizamentos de terra e tempestades, por exemplo (IPCC, 2023). Em virtude destes desdobramentos das variações climáticas a produção de alimentos e, conseqüentemente, a segurança alimentar, sofrem impactos severos (Bouteska *et al.*, 2024).

Os prejuízos causados à agropecuária são inúmeros (Oliveira; Prado e Monteiro, 2022), tais como redução das áreas cultiváveis e alteração ou diminuição na época de semeadura (Pandolfo *et al.*, 2014; Evangelista *et al.*, 2022); maior incidência de locais sob condição de estresse hídrico (IPCC, 2023d); conversão de florestas tropicais em savanas e de áreas de vegetação semiárida em regiões de formação vegetal árida (MMA, 2016); diminuição da produtividade (Cuadra *et al.*, 2018; Assad *et al.*, 2019b; Carvalho

et al., 2020; Cintra; Melo e Menezes, 2020; Cunha e Braga, 2022; Távora; França e Lima, 2022); perda de biodiversidade (Távora; França e Lima, 2022; Assad *et al.*, 2019b); impactos financeiros (Assad *et al.*, 2019b) à nível nacional, com perdas no Produto Interno Bruto (PIB) na casa dos bilhões de reais anuais (Tanure, 2020); intensificação dos processos erosivos e redução na fertilidade dos solos (Carter e Gulati, 2014; Assad *et al.*, 2019b); declínio da população de agentes polinizadores (Assad *et al.*, 2019b; Távora; França e Lima, 2022); diminuição da fertilidade dos animais e plantas (Assad *et al.*, 2019b); bem como alterações na manifestação e no impacto de pragas e doenças nas plantas (Auad *et al.*, 2017; Raza & Bebbber, 2022; Singh *et al.*, 2023; Lahlali *et al.*, 2024).

Figura 4 - Anomalias de temperatura oceânica e terrestre globais.

Anomalias da Temperatura Média Global das Superfícies Terrestre e Oceânica
Janeiro-Dezembro



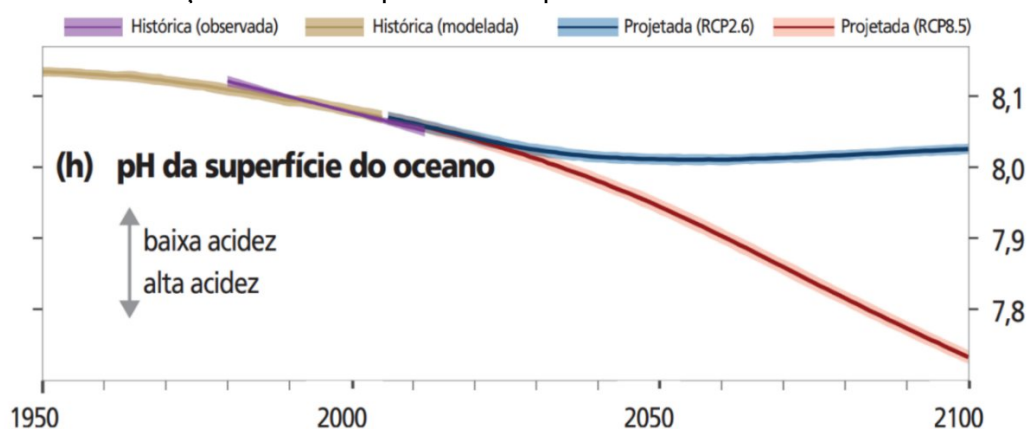
Fonte: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2025.

Outra consequência das mudanças climáticas é a acidificação ocorrida nos oceanos. A acidificação é um processo natural, no qual são absorvidos, aproximadamente $\frac{1}{4}$ do CO_2 emitido antropicamente oceanos (Hood *et al.*, 2009). Neste fenômeno, o CO_2 atmosférico é dissolvido na superfície do oceano, gerando ácido carbônico (H_2CO_3), que dissocia-se em íons de bicarbonato (HCO_3^{-1}) e hidrogênio (H^+) (Sodré; Silva; Monteiro, 2016). Essa reação promove o aumento na concentração dos íons de hidrogênio, promovendo a queda do pH na água dos oceanos, tornando-a mais ácida (Perez *et al.*, 2023). Em função das crescentes emissões de carbono pelo ser humano, a acidificação dos oceanos tem se intensificado (Figura 5), prejudicando a formação de carbonato de cálcio, que é fundamental na formação de organismos calcificadores, como os corais (Hood *et al.*, 2009; Sodré; Silva; Monteiro, 2016).

Segundo Sodré, Silva e Monteiro (2016) os plânctons são a fonte de alimento dos corais, que secretam carbonato de cálcio e dão origem aos recifes. As colorações

dos corais são parcialmente decorrentes da simbiose com algas, as quais estão presentes nas células deles. Em condições estressantes, como calor extremo e incremento na acidificação dos oceanos, essa simbiose pode ser quebrada, provocando a exposição dos esqueletos de carbonato de cálcio e dando origem ao fenômeno conhecido como branqueamento (Sodré; Silva; Monteiro, 2016).

Figura 5 - Mudanças ocorridas e previstas no pH do oceano.



Fonte: IPCC, 2019.

2.3 AGROPECUÁRIA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Iniciada em 1960, a Revolução Verde foi um processo de disseminação de tecnologias agrícolas, tendo por objetivo o aumento da produção, combate à fome e a modernização das práticas agrícolas do período (Octaviano, 2010; Lazzari; Souza, 2017). Ela propiciou a expansão da produção agrícola (Kumar, 2017), transformação de áreas impróprias em áreas agricultáveis, bem como tecnologias de manejo e de produtos - a citar os fertilizantes (Campagnolla, Macêdo, 2022), fazendo com que maior quantidade de alimentos estivesse disponível à população (Pereira *et al.*, 2010).

A revolução, no Brasil, ainda que tenha impulsionado a agropecuária, converteu-a em um sistema exploratório, modelando a construção do agronegócio que, atualmente, é marcado pelo uso irrefreado de defensivos agrícolas (Benincá; Bonatti, 2020). Como ponto negativo do agronegócio, há diversos impactos ambientais, tais como o desmatamento de ecossistemas, a contaminação da água, dos solos e do ar em função do uso de defensivos, e a degradação da biodiversidade (Gomes, 2019).

Com base nesses e em outros fatores, a agropecuária, atualmente, é um dos principais setores responsáveis pela emissão de GEEs (Thorstensen; Zuchieri, 2021) sendo a maior emissora de CH₄ e N₂O, além de contribuir com emissões líquidas de

CO₂ através do desmatamento e de mudanças no uso da terra para fins agrícolas (Blandford; Hassapoyannes, 2018). O setor agropecuário foi responsável, em 2020, por 28,5% das emissões totais brasileiras (Figura 6), correspondendo a 477.670,5 gigagramas (Gg) ou milhares de toneladas de CO₂eq (BRASIL, 2020). Segundo as estimativas de emissões de GEEs no Brasil levantadas pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), o setor Agropecuária é dividido em sete subsetores, a citar: Aplicação de Ureia, Calagem, Cultivo de Arroz, Fermentação Entérica, Manejo de Dejetos, Queima de Resíduos Agrícolas e Solos Manejados (MCTI, 2022).

Quadro 1 - Gases de Efeito Estufa (GEEs) e suas fontes emissoras associadas à agropecuária.

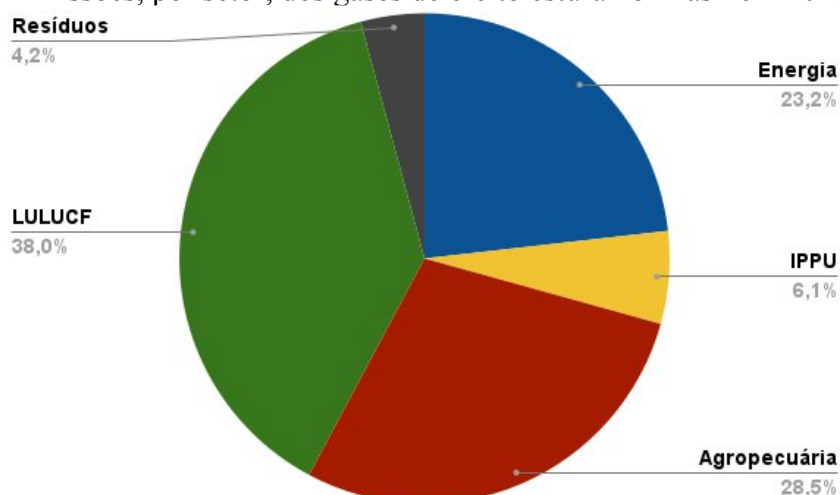
Gases de Efeito Estufa (GEEs)	Fontes emissoras
CO ₂	▪ Mudança no uso da terra e desmatamento; ▪ Aplicação de dejetos em pastagem; ▪ Uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos; ▪ Queima de combustíveis fósseis.
CH ₄	▪ Mudança no uso da terra e desmatamento; ▪ Fermentação entérica, manejo de dejetos de animais, cultivo de arroz irrigado, queima de resíduos agrícolas; ▪ Tratamento dos resíduos.
N ₂ O	▪ Dejetos de animais, uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos, queima de resíduos agrícolas; ▪ Aplicação de dejetos em pastagem; ▪ Manejo da terra e desmatamento.
CO (emissões indiretas)	▪ Queima da cana-de-açúcar; ▪ Queimadas para mudança no uso da terra e desmatamento.
NO _x (emissões indiretas)	▪ Queima de resíduos agrícolas de cana-de-açúcar e algodão; ▪ Queimadas para mudança no uso da terra e desmatamento.

Fonte: Adaptado de Assad *et al.*, 2019a; Alencar *et al.*, 2023; Estevam; Pavão; Assad. 2023.

Para Assad *et al.* (2019a), entretanto, além das atividades agropecuárias previamente citadas, algumas como uso de fertilizantes nitrogenados, sistema convencional de preparo do solo e a utilização de combustíveis fósseis emissores de CO₂ também ingressaram como atividades diretas e indiretas na emissão de GEEs (Quadro 1). Ainda segundo Blandford e Hassapoyannes (2018), as emissões oriundas da

Agricultura, Florestamento e Outros Usos da Terra (AFOLU, sigla para o termo em inglês) aumentam com a expansão agrícola, o desenvolvimento da pecuária e a intensificação do uso de insumos, como os fertilizantes. A pecuária, em especial a criação de animais ruminantes, é a principal fonte de emissões diretas de GEE e de mudanças no uso da terra (Blandford; Hassapoyannes, 2018), conforme confirmam as estimativas de emissão de 2020.

Figura 6 – Emissões, por setor, dos gases de efeito estufa no Brasil em 2020.



Legenda: LULUCF - Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (sigla em inglês); IPPU – Processos Industriais e Uso de Produtos (sigla em inglês)

Fonte: Adaptado de BRASIL, 2022.

As emissões do setor Agropecuária são, na maioria, oriundas de CH₄, que correspondeu a 62,5% das emissões totais do setor (Brasil, 2022). O metano é proveniente da fermentação entérica, cultivo de arroz, manejo de dejetos e da queima de resíduos agrícolas; por sua vez, o N₂O contribuiu com 32% das emissões, os quais originaram-se dos dejetos em pastagens, aplicação de adubos nitrogenados e pela decomposição de restos de colheita (MCTI, 2022). Já o CO₂ (5,4%) advém da calagem e do uso de ureia (Brasil, 2022). De acordo com as estimativas do MCTI (2022), o subsetor Fermentação Entérica foi o que obteve participação mais expressiva nas emissões, contribuindo com 57% (12.958,0 Gg de CH₄) das emissões do setor, seguido do subsetor Solos Manejados, com participação de 31% nas emissões.

Os demais setores obtiveram emissões individuais inferiores a 4,8% cada (Brasil, 2022). Além dos animais ruminantes, como os bovinos e ovinos, animais como suínos e equídeos também possuem fermentação entérica (Ascoli, 2018; Lima, 2024), e a quantidade varia, dependendo da espécie, qualidade e quantidade de alimento consumido, bem como a digestibilidade desses alimentos e as condições do sistema de

criação (Brasil, 2022). Os bovinos são os principais contribuintes nas emissões entéricas, sendo responsáveis por quase 97% dos gases produzidos, e destes, mais de 88% referem-se ao gado de corte (MCTI, 2022).

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e o MCTI (2015), considera-se como fator de emissão de CH₄, aquele de 1 kg CH₄/cab./ano para suínos; 10 kg CH₄/cab./ano para asininos e muares; 55 kg CH₄/cab./ano para bubalinos; 5 kg CH₄/cab./ano para caprinos; 18 kg CH₄/cab./ano para equinos; e 5 kg CH₄/cab./ano para ovinos. Para bovinos há distinção de acordo com as categorias dos animais, compreendendo os anos de 2007 a 2010 (os intervalos ocorrem, visto que cada estado possui seus fatores ao longo de cada ano): bovinos de corte machos com emissão entre 51-55 kg CH₄/cab./ano; bovinos de corte jovens entre 40-43 kg CH₄/cab./ano; para fêmeas de corte, 54-78 kg CH₄/cab./ano (EMBRAPA; MCTI, 2015). Por fim, as fêmeas leiteiras apresentam fatores de 54-83 kg CH₄/cab./ano, para o período de 2007 a 2010 (EMBRAPA; MCTI, 2015).

O subsetor Manejo de Dejetos contribuiu com aproximadamente 5% das emissões do setor Agropecuária, com emissões de CH₄ (855,4 Gg) e de N₂O (15,31 Gg), com estes valores são modulados de acordo com o tipo de tratamento dos dejetos, o fator de excreção e o número de animais; enquanto para o subsetor Cultivo de Arroz, as emissões ficaram próximas das 396 Gg CH₄, correspondendo a 1,7% das emissões (MCTI, 2022). Segundo estimativas do MCTI (2022), as emissões decorrentes dos Solos Manejados totalizaram 31% das emissões oriundas da agropecuária, participando com a emissão de 477,68 Gg N₂O. No subsetor são estimadas as emissões diretas, como o uso de fertilizantes sintéticos e esterco de animais, incorporação de resíduos de colheita ao solo, em função da mineralização de nitrogênio, e em decorrência dos dejetos que não foram manejados, sendo depositados diretamente no solo. Já as emissões indiretas originam-se do nitrogênio (N) acrescido aos solos na forma de fertilizantes, dejetos animais e adubos (MCTI, 2022).

Para o subsetor Queima de Resíduos Agrícolas atribui-se 0,1% das emissões ocorridas no setor Agropecuária, o que representa 9,9 Gg CH₄ e 0,74 Gg N₂O - o CO₂ não é contabilizado já que, ainda que gerado durante a queima, considera-se que é reabsorvido durante a próxima colheita, através da fotossíntese, tornando-o parte do ciclo biológico (Lasco *et al.*, 2006; MCTI, 2022). As emissões do subsetor dependem da quantidade e do tipo de material queimado, além das condições em que a queima é realizada (MCTI, 2022). Por fim, para a Aplicação de Ureia e a Calagem, há,

respectivamente, 0,9% e 4,5% de contribuição quanto às emissões, contribuindo com 4.412 Gg e 21.593 Gg de CO₂ em 2020, sendo a ureia e o calcário da calagem destinados para uso agrícola (MCTI, 2022).

De acordo com a tecnificação dos sistemas pecuários, a produção intensiva migrou para sistemas em confinamento, os quais tiveram grande impacto positivo na produtividade da pecuária bovina. Apesar disso, a intensificação da produção também traz consigo a intensificação na geração dos resíduos, cujo manejo incorreto viabiliza o potencial poluidor e propagador de doenças deste (Pinto *et al.*, 2023). Os dejetos dos animais contêm ampla variedade de nutrientes, água, elevado teor de energia e temperatura adequada, propiciando o ambiente ideal para que os vetores de doenças desenvolvam-se (Amaral *et al.*, 2004).

Os dejetos produzidos pelos animais abrangem as excretas (urina e fezes), o material utilizado na cama, água utilizada para consumo e para higienização das instalações, pelos e alimentos desprezados (MAPA, 2018). Segundo Konzen e Alvarenga (2002), os bovinos leiteiros produzem, em média, 10% de seu peso vivo em fezes e urina, podendo ultrapassar os 45 kg de esterco/animal/dia, a depender da genética, alimentação, desempenho e manejo (MAPA, 2018). Além disso, a ausência de manejo e destinação corretos pode promover a contaminação dos recursos hídricos e do solo, bem como acarreta a emissão de GEEs (Machado, 2011).

Ainda que seja uma emissora expressiva, a agropecuária atua não só como fonte (emitindo GEEs), participando também, como sumidouro (capturando GEEs) no ambiente, como através do sequestro de CO₂ (Machado *et al.*, 2022). Por meio da fotossíntese, por exemplo, as plantas são capazes de capturar CO₂ e devolver oxigênio (O₂) para a atmosfera (Assad *et al.*, 2019). Além disso, o manejo correto dos solos, a redução das queimadas e do desmatamento, bem como práticas agrícolas alternativas são opções para que a agropecuária minimize os impactos causados ao meio ambiente (Machado *et al.*, 2022). As mudanças climáticas também têm efeito diretamente sobre a agropecuária, uma vez que a atividade é dependente do clima e de recursos naturais, como o solo e a água (Sambuichi *et al.*, 2012; Machado *et al.*, 2022).

2.4 RELEVÂNCIA DA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA

Paralelamente aos níveis preocupantes das emissões e do cenário das mudanças climáticas, o Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais (do inglês “*United*

Nations Department of Economic and Social Affairs”, UNDESA), divulgou em 2024 sua revisão a respeito das “Perspectivas da População Mundial” (do inglês “*World Population Prospects*”), estimando que a população deve alcançar os 8,2 bilhões de pessoas no mesmo ano, e os 10.3 bilhões por volta de 2050 (UN, 2024). Este valor, nas estimativas divulgadas em 2019, estava na casa dos 8,5 bilhões em 2030 e 9,7 bilhões em 2050 (UN, 2019). Ainda que na previsão, após este número atingir o pico, inicie-se uma queda gradativa (UN, 2024), são necessárias alterações na produção de alimentos para que se possa nutrir toda a nova população adequadamente.

Caso a população atinja os 9,7 bilhões em 2050, haveria o crescimento de quase 40%, quando comparado ao ano de 2011, em que o número de pessoas no planeta era de 7,03 bilhões (Sands *et al.*, 2023). Para isso, Sands *et al.* (2023) estimam que as calorias disponíveis dos alimentos deveriam aumentar em 44%, e das colheitas, 47%. Em estudo feito por van Dijk *et al.* (2021), as estimativas levantadas apontam que a demanda mundial de alimentos cresça entre 35% e 56%, entre 2010 e 2050 e, tendo as mudanças climáticas em perspectiva, esse intervalo altera para 30% a 62%.

Em relatório divulgado pela FAO em 2009, os especialistas previram a necessidade de aumentar em 70% a produção de alimentos para alimentar uma população estimada em 9,1 bilhões de pessoas em 2050 (FAO, 2009). Ainda, a produção de cereais necessitaria aumentar em 3 bilhões de toneladas, enquanto a produção de carnes necessitaria alcançar 470 milhões de toneladas - um aumento acima de 200 milhões de toneladas (FAO, 2009).

No setor de produção de alimentos o Brasil destaca-se, mundialmente, como o 2º maior produtor de carne bovina e carne de frango e 4º maior produtor de carne suína (FGV, 2023), além de ser o 6º maior produtor de leite (USDA, 2024) na pecuária. No setor agrícola, o Brasil é o maior produtor de soja (39% da produção mundial), café (39%), açúcar (25%), laranja (32%) e suco de laranja (72%) (USDA, 2024). A produção é demonstrada no faturamento do agronegócio, que lucrou aproximadamente 2.5 milhões de reais em 2023, sendo mais de 720 mil do ramo pecuário (CEPEA-ESALQ; CNA, 2024).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2023, foram produzidos mais de trinta e cinco milhões de litros de leite, quase 5 bilhões de dúzias de ovos, a cerca de quarenta e três milhões de cabeças de suínos e mais de 1,5 bilhões de aves. No período foram abatidos 33.461.190 milhões de cabeças de bovinos, mais de 56 milhões de cabeças de suínos e por volta de 6 bilhões de frangos (IBGE,

2023). Nos 9 primeiros meses de 2024, 29.507.703 bovinos, mais de 43 milhões de suínos e quase 5 bilhões de frangos foram abatidos, demonstrando a tendência a superar a produção de 2023 (IBGE, 2024a; 2024b; 2024c).

Em 2023, o Brasil exportou 2,296 milhões de toneladas de carne bovina a países como China, Estados Unidos e Hong Kong, obtendo assim, um faturamento de aproximadamente US\$10,5 bilhões no período (ABIEC, 2024). O consumo interno de carne bovina, no mesmo ano, era de 37,4 kg/hab/ano (ABIEC, 2024). Os 5,3 bilhões de frangos abatidos com Selo de Inspeção Federal (SIF) resultaram em Valor Bruto de Produção (VBP) de R\$91,64 bilhões em 2023 (ABPA, 2024), sendo que 65,3% da produção permaneceu no mercado interno, para suprir os 45,1 kg/hab/ano de consumo; e o restante foi destinado à exportação (ABPA, 2024). Em relação à produção de ovos, esta contribuiu com R\$24,52 bilhões de VBP em 2023 (ABPA, 2024), tendo apenas 1% de sua produção destinada à exportação e o restante dirigido ao mercado interno, que possui consumo de 242 ovos/hab/ano (ABPA, 2024). Para a carne suína, o valor bruto da produção correspondeu, em 2023, à R\$34,17 bilhões (ABPA, 2024); havendo no país o consumo de 18,3 kg/hab/ano. A maioria da carne produzida é destinada ao mercado interno, com menos de 24% dirigida à exportação (ABPA, 2024). Já o leite obteve VBP estimado de US\$ 15,16 bilhões de dólares em 2023 (FAO, 2023), apresentando um consumo interno estimado de 183 litros/hab/ano em 2023 (CILEite; EMBRAPA, 2024).

2.5 O LEITE E A CADEIA LEITEIRA

O leite e seus derivados constituem fontes primárias de cálcio em uma dieta, em função da alta absorção (Shkembi; Huppertz, 2022), além de ser fonte importante de proteína. Segundo a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TBCA) sabe-se que 240 mL de leite possuem 5,3g de proteína, 7,3g de lipídios, 156 kcal de energia, 258 mg de cálcio, 196 mg de ferro e 319 mg de potássio, além de ser fonte de vitaminas (USP; FoRC, 2023). Sendo assim, os produtos lácteos são tidos como a terceira maior fonte de proteínas e a quinta maior em energia (GDP, 2018). O Guia Alimentar para a População Brasileira (MS, 2008) recomenda o consumo diário de 3 porções de leite e derivados, os quais são fundamentais em todas as fases da vida.

Para adultos, segundo a FAO (2023), o leite e os lácteos possuem efeitos positivos na redução do risco de problemas de saúde como hipertensão, diabetes tipo 2, derrame, obesidade, osteoporose e câncer colorretal e de mama. Segundo Haraguchi,

Abreu e Paula (2006), as proteínas do soro do leite também apresentam ótima composição de aminoácidos, contendo peptídeos bioativos que possibilitam diversas propriedades funcionais às proteínas, melhorando o desempenho muscular, controle de pressão arterial e redução de problemas cardiovasculares. Além disso, a significativa presença do cálcio atua na redução da gordura corporal (Haraguchi; Abreu; De Paula, 2006).

Na diabetes, o alto conteúdo de aminoácidos presentes nas proteínas do soro do leite auxilia no controle da glicemia e no funcionamento da insulina, contribuindo na regulação dos níveis de açúcar sanguíneos e na saciedade (Bruzaroski *et al.*, 2022). Ainda, os minerais presentes nos lácteos operam nas membranas vasculares, auxiliando na redução da vasoconstrição e, portanto, na regulação da pressão arterial (Bruzaroski *et al.*, 2022). Bruzaroski *et al.* (2022) também ressaltam a importância do cálcio, ferro, magnésio, vitamina D e fósforo para a composição e manutenção de ossos e dentes; bem como a gordura contida no leite colabora para o aumento do colesterol bom (do inglês “*High Density Lipoprotein*, HDL), que atua na retirada do excesso de colesterol do organismo, transportando-o ao fígado para que haja degradação dele.

Por seus benefícios e outros muitos fatores, o leite é consumido por aproximadamente 6 bilhões de pessoas mundialmente (GDP, 2018). Para suprir essa alta demanda, 600 milhões de pessoas trabalham a cerca de 133 milhões de fazendas leiteiras no mundo, além da dependência de quase 10% da população mundial da produção de leite (GDP, 2018). No censo agropecuário mais recente realizado pelo IBGE (2017), obteve-se aproximadamente 1.176 milhões de estabelecimentos produtores de leite de vaca, sendo o *ranking* dos estados com maior número de estabelecimentos: Minas Gerais (216.460), Rio Grande do Sul (129.877), Bahia (108.268), Paraná (87.063) e Ceará (73.272) (IBGE, 2017). Em 2017, quando a produção atingiu os trinta bilhões de litros, os estados que mais produziram leite foram Minas Gerais, com 8,7 milhões de litros; Rio Grande do Sul, com 4 milhões; Paraná, com 3,2 milhões; Santa Catarina, com 2,8 milhões; e Goiás, com 2,6 milhões (IBGE, 2017).

2.5.1. Cadeia Leiteira Paranaense e Paulista

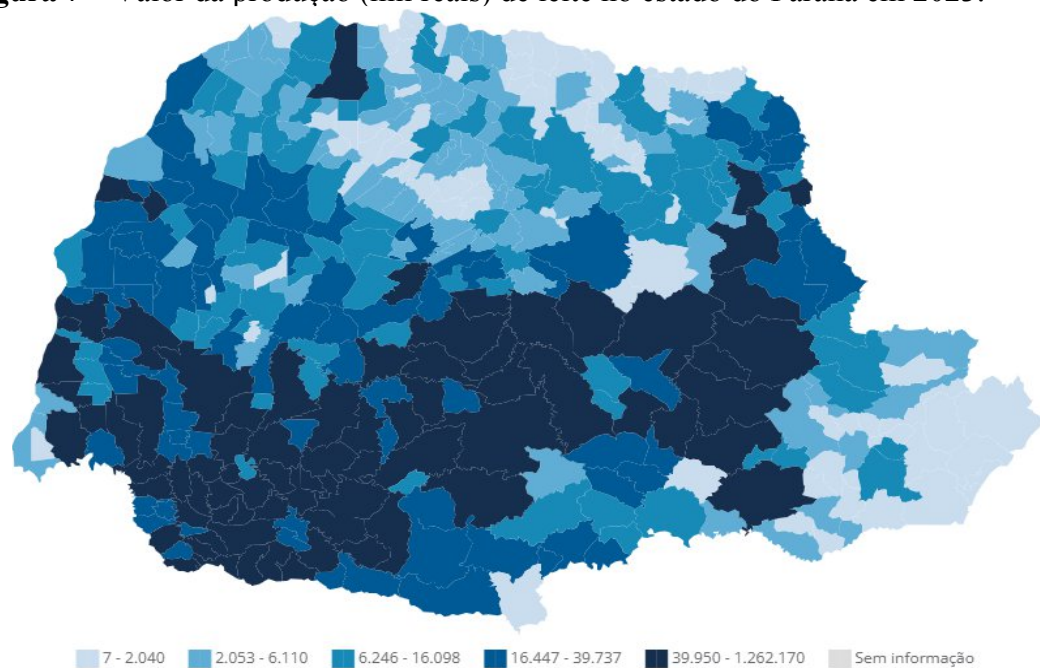
Já no ano de 2023, o Brasil alcançou produção superior a 35 bilhões de litros de leite (IBGE, 2024d). Os estados que mais contribuíram para este valor foram Minas

Gerais (9,4 bilhões de litros), Paraná (4,6 bilhões de litros), Rio Grande do Sul (4,1 bilhões de litros), Santa Catarina (3,2 bilhões de litros) e Goiás (3 bilhões de litros). A produção apenas do estado mineiro contribuiu com mais de R\$ 21,5 milhões no período – correspondente a cerca de $\frac{1}{4}$ da arrecadação nacional (IBGE, 2024d; IBGE, 2024e). O Paraná, segundo maior estado produtor, é também àquele que ocupa as duas primeiras posições no ranking de maiores municípios produtores brasileiros: em 1º lugar Castro (454 milhões de litros); em 2º lugar está Carambeí (cerca de 270 milhões de litros) e, por fim, Patos de Minas (MG) em 3º lugar (211 milhões de litros) (IBGE, 2024e).

Notoriamente o estado do Paraná é peça fundamental na cadeia leiteira nacional. Em seu último Censo Agropecuário, realizado em 2017, o IBGE computou, no estado do Paraná, mais de 87 mil estabelecimentos produtores de leite de vaca, bem como 873.512 vacas ordenhadas nestas propriedades (IBGE, 2017). Em 2019 o valor da produção encontrava-se na casa dos R\$5,7 milhões, passando para R\$7,8 milhões em 2020, R\$8,7 em 2021, R\$10,9 em 2022, e alcançando os R\$11,4 milhões em 2023 (IBGE, 2024f). O estado apresentou 25 propriedades – destas, 9 estão em Carambeí - presentes no Ranking Top 100 de 2024, organizado pelo MilkPoint (MilkPoint, 2024). A cadeia obteve o valor de produção de R\$11,4 milhões de reais em 2023, com os municípios de Castro (R\$ 1,26 milhões), Carambeí (R\$ 755,6 mil) e Arapoti (R\$ 313,8 mil) os que apresentaram as três maiores contribuições co esse valor (Figura 7) (IBGE, 2024f).

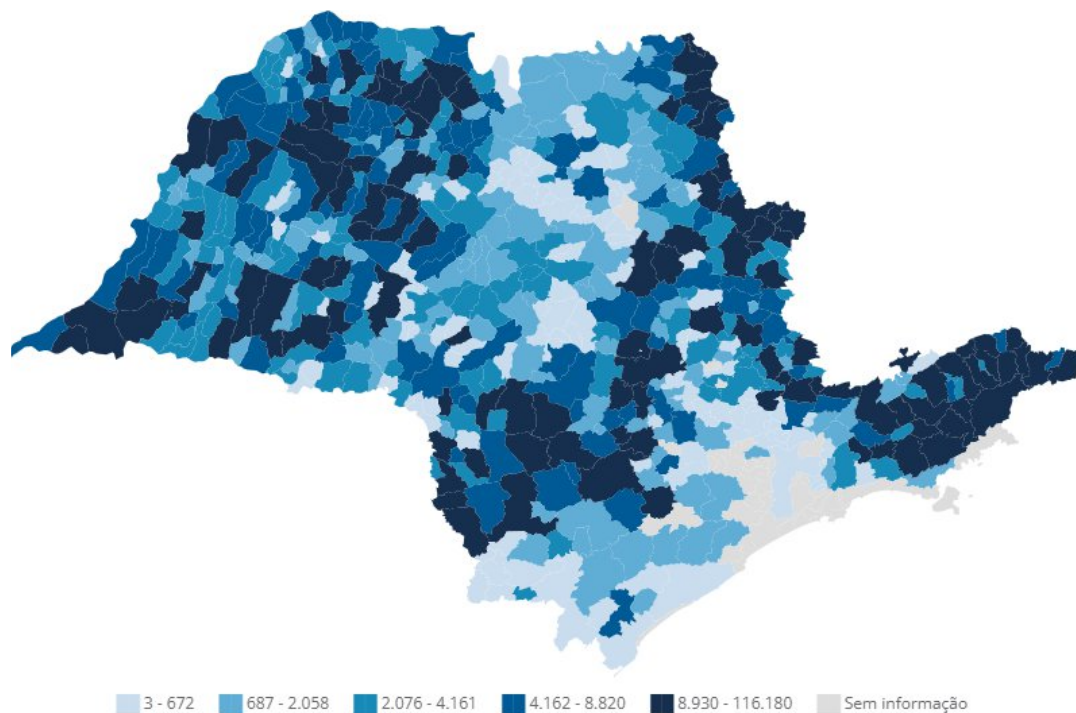
Além do Paraná, o estado de São Paulo também apresenta grande relevância para a pecuária de leite brasileira. O estado contribuiu com 1,5 milhões de litros de leite em 2023 (Figura 8), os quais foram responsáveis pela arrecadação que ultrapassou os R\$3,7 milhões (IBGE, 2024g). O município de Tapiratiba foi o maior produtor, com o valor de produção superando os R\$116 mil (IBGE, 2024g). Ainda, o estado paulista abriga a propriedade com a maior produção do Brasil há 11 anos ininterruptos, a Fazenda Colorado, localizada em Araras, obteve a produção média superior a 96 mil litros de leite por dia em 2023 (MilkPoint, 2024).

Figura 7 – Valor da produção (mil reais) de leite no estado do Paraná em 2023.



Fonte: IBGE, 2024f.

Figura 8 – Valor da produção (mil reais) de leite no estado de São Paulo em 2023.



Fonte: IBGE, 2024f.

3 REFERÊNCIAS

Almeida, T. F. A. de. **Estimativa do balanço de gases do efeito estufa em propriedade leiteira integrada com a produção vegetal**: a partir das ferramentas GHG Protocol Agricultura e Florestas, e Cool Farm Tool. 2023. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Produção Animal da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia. Pirassununga, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.10.2023.tde-18122023-125900>. Acesso em: 20 jun. 2025.

Al Khourdajie, A.; van Diemen, R.; Lamb, W. F.; Pathak, M.; Reisinger, A.; de la Rue du Can, S.; Skea, J.; Slade, R.; Some, S.; Steg, L. IPCC, Annex II: Definitions, Units and Conventions. In: Shukla, P. R.; Skea, J.; Slade, R.; Al Khourdajie, A.; van Diemen, R.; McCollum, D.; Pathak, M.; Some, S.; Vyas, P.; Fradera, R.; Belkacemi, M.; Hasija, A.; Lisboa, G.; Luz, S.; Malley, J. **IPCC, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Annex-II.pdf. Acesso em: 05 jun. 2025.

Amadori, C. **Emissão de Gases de Efeito Estufa, a partir do solo, em Sistemas integrados de Produção Agropecuária**. 2019. 84 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo. Curitiba, 2019. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/62712>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Amaral, C. M. C. do; Amaral, L. A. do; Lucas Júnior, J. de; Nascimento, A. A. do; Ferreira, D. de S.; Machado, M. R. F. Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1897-1902, nov./dez. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000600035>. Acesso em: 29 jan. 2025.

Arvanitoyannis, I. S. ISO 14040: Life Cycle Assessment (LCA) – Principles and Guidelines. In: Arvanitoyannis, I. S. **Waste Management for the Food Industries**. 1ª ed. Elsevier Academic Press. 2008 p. 97-132. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-012373654-3.50006-7>. Acesso em: 17 jun. 2025.

Assad, E. D.; Costa, L. C.; Martins, S.; Calmon, M.; Feltran-Barbieri, R.; Campanili, M.; Nobre, C. A. **Papel do plano ABC e do Planaveg na adaptação da agricultura e da pecuária às mudanças climáticas**. Working Paper. São Paulo, Brasil: WRI Brasil, 2019b. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/AF_WRI_WorkingPaper_MudancasClimaticas_SumarioExecutivo_DIGITAL.pdf. Acesso em: 26 nov. 2024.

Assad, E. D.; Martins, S. C.; Cordeiro, L. A. M.; Evangelista, B. A. Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. In: Bungenstab, D. J.; Almeida, R. G.; Laura, V. A.; Balbino, L. C.; Ferreira, A. D. ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. Brasília,

DF: Embrapa, 2019a. p. 153-167. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1112696>. Acesso: 27 nov. 2024.

Assad, E. D.; Martins, S. C.; Pavão, E. de M.; Gusson, E.; Silva, J. P. da; Prado, A.; Pontes, C.; Biderman, R.; Esturba, T.; Romeiro, V. **Greenhouse Gas Protocol calculation tool forestry in Brazil**. WRI Brasil, 2020. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/publicacoes/ferramenta-de-calculo-para-balanco-de-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-em-florestas-e>. Acesso em: 07 dez. 2023.

Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes (ABIEC). Mercado externo brasileiro. *In*: Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes (ABIEC). **Beef Report 2024**. Disponível em: <https://www.abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2024-perfil-da-pecuaria-no-brasil/>. Acesso em: 02 dez. 2024.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). **Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos**. São Paulo, 2012. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/atlas-brasileiro/>. Acesso em: 08 nov. 2024.

Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA). Carne de frango - produção brasileira. *In*: Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA). **Relatório anual 2024**. Disponível em: https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2024/04/ABPA-Relatorio-Anual-2024_capa_frango.pdf. Acesso em: 02 dez. 2024.

Auad, A. M.; Fonseca, M. das G.; Resende, T. T. Efeito do aquecimento global sobre pragas das pastagens. *In*: Bettiol, W.; Hamada, E.; Angelotti, F.; Auad, A. M.; Ghini, R. (ed.). **Aquecimento Global e Problemas Fitossanitários**. 1ª ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017, p. 380-409. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1077623/1/2017LV03.pdf>. Acesso em: 14 maio 2025.

Barros Júnior, J. H.; Missiatto, J. V. F.; Marinho, L. A.; Simões, F. G.; Mohr, D. M.; Cardoso, M.; Cruz, J. A. R. da; Leandro Júnior, W.; Abatti, G.; Nascimento, A. F. do. Emissões de óxido nitroso do solo de sistemas silvipastoris. *In*: Encontro de Ciência e Tecnologias Agrossustentáveis, 5.; Jornada Científica da EMBRAPA Agrossilvipastoril, 10., 2021. Sinop. **Resumos...** Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 46. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1138941>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Bazzi, C. L.; Schenatto, K.; Sobjak, R. Conceitos sobre o Agro 4.0 e Indústria 4.0 *In*: Dias, E. M.; Dourado Neto, D.; Scoton, M. L. R. P.; Oliveira, D. H. de; Santos, I. M. G. L. dos; Menezes, J. H. V. **Agro 4.0: fundamentos, realidades e perspectivas para o Brasil**. 1ª ed. Rio de Janeiro, RJ: Autografia, 2023, p. 44-57. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/storage/arquivos/DCPV/files/Agro4.0-livro.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2024.

Benincá, D.; Bonatti, L. C. Agroecologia: Uma opção de sustentabilidade no campo e na cidade. **Revista Brasileira de Agroecologia**, [S.I.], v. 15, n. 5, p. 191- 203, dez. 2020. Disponível em:

<http://revistas.abaagroecologia.org.br/index.php/rbagroecologia/article/view/23201/14308>. Acesso em: 28 nov. 2024.

Blandford, D.; Hassapoyannes, K. **The role of agriculture in global GHG mitigation**. OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers, n. 112, OECD Publishing: Paris, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1787/da017ae2-en>. Acesso em: 26 nov. 2024.

Blumberg, L. M. Theory of Gas Chromatography. *In*: Poole, C. F. **Gas Chromatography**. 2021. p. 19-97. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820675-1.00026-5>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Borhan, M. S.; Khanaum, M. M. Sensors and Methods for Measuring Greenhouse Gas Emissions from Different Components of Livestock Production Facilities. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, [S.l.], v. 10, n. 12, p. 242-272, dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/gep.2022.1012014>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Bouteska, A.; Sharif, T.; Bhuiyan, F.; Abedin, M. Z. Impacts of the changing climate on agricultural productivity and food security: Evidence from Ethiopia. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 449, abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141793>. Acesso em: 12 maio 2025.

Brasil. **Decreto nº 99.280, de 6 de junho de 1990**. Promulgação da Convenção de Viena para a Proteção da Camada de Ozônio e do Protocolo de Montreal sobre Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio. Brasília: Presidência da República, 1990. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1990-1994/d99280.htm#:~:text=DECRETO%20No%2099.280%2C%20DE,Destroem%20a%20Camada%20de%20Oz%C3%B4nio.

Brkić, Z. Increasing water temperature of the largest freshwater lake on the Mediterranean islands as an indicator of global warming. **Heliyon**, [S.l.] v. 9, n. 8, ago. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19248>. Acesso em: 22 nov. 2024.

Bruzaroski, S. R.; Correia, S. de S.; Araujo, K. E. de; Sant'Anna, R. D.; Santana, E. H. W. de. **Curiosidades sobre o leite: verdades e mitos**. 2022. Disponível em: https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/48399/1/CARTILHA%20CURIOSIDADES%20SOBRE%20O%20LEITE_final.pdf. Acesso em: 06 dez. 2024.

Cabral, O. M. R.; Freitas, H. C. de; Cuadra, S. V.; Nogueira, S. F.; Koenigkan, L. V.; Ligo, M. A. V.; Andrade, C. A.; Gash, J. H.; Rocha, H. R. da; Rossi, P. Eddy covariance fluxes of greenhouse gases observed in a renewed pasture in the southeast of Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, [S.l.], v. 356, set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110177>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Campagnolla, C.; Macêdo, M. M. C. Revolução Verde: passado e desafios atuais. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, Brasília, v. 39, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2022.v39.26952>. Acesso em: 15 maio 2025.

Cardoso, M. de O. **Indústria 4.0: a quarta revolução industrial**. 2016. 43 f. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/17086/1/CT_CEAUT_2015_08.pdf. Acesso em: 01 nov. 2024.

Carvalho, A. L. de; Santos, D. V.; Marengo, J. A.; Coutinho, S. M. V.; Maia, S. M. F. Impactos da ocorrência de eventos climáticos extremos na produção agrícola brasileira. **Sustainability in Debate**, Brasília, v. 11, n. 3, p. 211-224, dez. 2020. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/sust/article/view/33814/28556>. Acesso em: 13 maio 2025.

Carter, S.; Gulati, M. **Understanding the Food Energy Water Nexus: Climate change, the Food Energy Water Nexus and food security in South Africa**. British High Commission Pretoria, África do Sul: WWF. 2014. Disponível em: http://awsassets.wwf.org.za/downloads/1_a16231_wwf_climate_change_few_and_food_security_in_sa_online.pdf. Acesso em: 14 maio 2025.

Cassia, R.; Nocioni, M.; Correa-Aragunde, N.; Lamattina, L. Climate Change and the Impact of Greenhouse Gases: CO₂ and NO_x, Friends and Foes of Plant Oxidative Stress. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 9, mar. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00273>. Acesso em: 29 jul. 2025.

Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA) - ESALQ/USP; Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA). **PIB do agronegócio fecha 2023 com queda de 2,99%**. mar. 2024. Disponível em: https://cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/CT-PIB-AGRO_26.MAR.24.pdf. Acesso em: 02 dez. 2024.

Centro de Inteligência do Leite (CILEite); Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **Leite em Números: Consumo per capita de leite e derivados - Brasil**. 2024. Disponível em: https://www.cileite.com.br/leite_numeros_consumo. Acesso em: 05 dez. 2024.

CFT – Cool Farm Tool. 2024. Disponível em: <https://coolfarm.org/>. Acesso em: 25 jan. 2024.

Ciais, P.; Sabine, C.; Bala, G.; Bopp, L.; Brovkin, V.; Canadell, J.; Chhabra, A.; Defries, R.; Galloway, J.; Heimann, M.; Jones, C.; Le Quéré, C.; Myneni, R. B.; Piao, S.; Thornton, P. Carbon and other biogeochemical cycles. In: Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, G. K.; Tignor, M.; Allen, S. K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Medgley, P. M. (ed.). **Climate change 2013: the physical science basis**. Contribution of working group I to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 465-570. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/284671115_Carbon_and_other_biogeochemical_cycles. Acesso em: 08 nov. 2024.

Cintra, P. H. N.; Melo, O. F. P. de; Menezes, J. O. S. de. Produção agrícola: uma revisão bibliográfica sobre as mudanças climáticas e produtividade de plantas graníferas

no Brasil. **Revista Agrotecnologia**, Ipameri, v. 11, n. 1, p. 87-94, 2020. Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/agrotecnologia/article/view/9720>. Acesso em: 13 maio 2025.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). **Emissões Veiculares no Estado de São Paulo**. São Paulo, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2019/02/Relat%C3%B3rio-Emiss%C3%B5es-Veiculares-2017.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2024.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). **O que é o ozônio e onde se encontra?**. São Paulo, 2014. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/prozonesp/wp-content/uploads/sites/16/2014/03/6265-p-publicacao_ozono.pdf. Acesso em: 08 nov. 2024.

Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 267, de 14 de setembro de 2000**. Dispõe sobre a proibição da utilização de substâncias que destroem a Camada de Ozônio. 2000. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=265. Acesso em: 23 abr. 2025.

Cordeiro, L. A. M.; Delgado, E.; Franchini, J. C.; Sá, J. C. de M.; Landers, J. N.; Amado, T. J. C.; Rodrigues, R. de A. R.; Roloff, G.; Bley Júnior, C.; Almeida, H. G.; Mozzer, G. B.; Balbino, L. C.; Galerani, P. R.; Evangelista, B. A.; Pellegrino, G. Q.; Mendes, T. de A.; Amaral, D. D.; Ramos, E.; Mello, I.; Ralisch, R. Quais as consequências do aquecimento global e da mudança do clima sobre a agricultura e a pecuária?. In: Cordeiro, L. A. M.; Delgado, E.; Franchini, J. C.; Sá, J. C. de M.; Landers, J. N.; Amado, T. J. C.; Rodrigues, R. de A. R.; Roloff, G.; Bley Júnior, C.; Almeida, H. G.; Mozzer, G. B.; Balbino, L. C.; Galerani, P. R.; Evangelista, B. A.; Pellegrino, G. Q.; Mendes, T. de A.; Amaral, D. D.; Ramos, E.; Mello, I.; Ralisch, R. **O Aquecimento Global e a Agricultura de Baixa Emissão de Carbono**. Brasília: MAPA/EMBRAPA/FEBRAPDP, 2012. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/publicacoes/o-aquecimento-global-e-a-agricultura-de-baixa-emissao-de-carbono.pdf>. Acesso em: 14 maio 2025.

Costa, F. de S.; Gomes, J.; Bayer, C.; Mielniczuk, J. Métodos para avaliação das emissões de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 693-700, mar.-abr., 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000200056>. Acesso em: 16 jun. 2025.

Costa Silva, R. W.; Paula, B. L. **Causa do aquecimento global**: antropogênica versus natural. *Terra Didática*, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 42-49, 2009. Disponível em: https://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v5/pdf-v5/TD_V-a4.pdf. Acesso: 16 out. 2023.

Clough, T. J.; Rochette, P.; Thomas, S. M.; Pihlatie, M.; Christiansen, J. R.; Thorman, R. E. Global Research Alliance N₂O chamber methodology guidelines: Design considerations. **Journal of Environmental Quality**, [S.l.], v. 49, n. 5, p. 1081-1091. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jeq2.20117>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Cuadra, S. V.; Heinmann, A. B.; Madari, B. E.; Assad, E. D.; Oliveira, P. P.; Angelotti, F.; Petreire, V. G.; Victoria, D. C.; Pereira, L. G. R.; Gondim, R. S.; Oliveira, A. F.; Higa, R. C. V. Mudanças climáticas e a agropecuária brasileira. *In*: Cuadra, S. V.; Heinemann, A. B.; Barioni, L. G.; Mozzer, G. B.; Bergier, I. (ed.). **Ação contra a mudança global do clima**: contribuições da Embrapa. Brasília, DF : Embrapa, 2018. p. 23-30. Disponível em:

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1090720/1/ODS13.pdf>. Acesso em: 13 maio 2025.

Cunha, D. A. da; Braga, M. J. Agricultura e mudança climática. *In*: Cunha, D. A. da; Braga, M. J. **Mudanças climáticas e convivência com o semiárido brasileiro**. Viçosa, MG : IPPDS, UFV, 2022. p. 7-16. Disponível em: <https://bibliotecasemiarios.ufv.br/bitstream/123456789/68/1/cartilha%20eletr%C3%B4nica.pdf>. Acesso em: 12 maio 2025.

Dathin, R. **Inovação e Revoluções Industriais**: uma apresentação das mudanças tecnológicas determinantes nos séculos XVIII e XIX. Decon - UFRGS, Porto Alegre - RS, 2003. Disponível em: <https://lume-re-demonstracao.ufrgs.br/artnoveau/docs/revolucao.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2024.

David, L. C. da; Vinholis, M. de M. B.; Carrer, M. J.; Torres, E. A. A. de M. Transformação digital da pecuária de corte intensiva no Brasil: Tecnologias e perfil de adoção. *In*: Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural - SOBER, 61., 2023, Piracicaba - SP. **Anais [...]**. Piracicaba: SOBER, 2023. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1160680/1/TransformacaoDigitalPecuaria.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2024.

Determinantes Sociais da Saúde (DSSBR) – Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ). **Conheça os ODS**. 2025. Disponível em: <https://dssbr.ensp.fiocruz.br/agenda-2030/conheca-os-ods/>.

Eismann, M.-S.; Smit, H. P. J.; Poyda, A.; Loges, R.; Kluß, C.; Taube, F. Combining the Eddy Covariance Method and Dry Matter Intake Measurements for Enteric Methane Emission Estimation from Grazing Dairy Cows. **Atmosphere**, [S.l.], v. 15, n. 11, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos15111269>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA); Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Dados. *In*: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA; Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI. **Emissões de metano por fermentação entérica e manejo de dejetos animais**. Disponível em: https://repositorio.mcti.gov.br/bitstream/mctic/5290/1/2015_emissoes_metano_fermentacao_enterica_manejo_dejetos_animais.pdf. Acesso em: 27 nov. 2024.

Estevam, C. G.; Pavão, E. M.; Assad, E. **Quantificação das emissões de GEE no setor agropecuário**: fatores de emissão, métricas e metodologias. Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia, Fundação Getúlio Vargas – FGV, São Paulo, SP, Brasil. 2023. Disponível em: <https://agro.fgv.br/sites/default/files/2023-10/M%C3%A9tricas%20Agropecu%C3%A1rias.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2025.

Evangelista, B. A.; Campos, L. J. M.; Silva, F. A. M. da; Simon, J.; Ribeiro, I. L.; Vale, T. M. do. Possíveis Impactos das Mudanças Climáticas Sobre o Zoneamento Agrícola de Risco Climático da Cultura da Soja no Estado do Tocantins. *In*: Collicchio, E.; Rocha, H. R. da (org.). **Agricultura e Mudanças do Clima no Estado do Tocantins: Vulnerabilidades, Projeções e Desenvolvimento**. Palmas, TO : Editora Universitária – EdUFT, 2022. p. 167-184. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1143011/1/cap7.pdf>. Acesso em: 12 maio de 2025.

Fundação Getúlio Vargas (FGV). **Programa Brasileiro GHG Protocol**. Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>. Acesso em: 12 mar. 2025.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **Contribution of terrestrial animal source food to healthy diets for improved nutrition and health outcomes** - An evidence and policy overview on the state of knowledge and gaps. Rome, FAO. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cc3912en>. Acesso em: 06 dez. 2023.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Reunião de Especialistas. **How to Feed the World in 2050**. Roma, Itália, 2009. Disponível em: https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf. Acesso em: 13 set. 2021.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **Top 10 Country Production of Raw milk of cattle**. 2023. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity. Acesso em: 22 jun. 2025.

Fuller, R. B. Spaceship Earth. *In*: **Operating Manual for Spaceship Earth**. 1969. p. 49-56. Disponível em: <https://architecture-history.org/books/Operating%20Manual%20for%20Spaceship%20Earth.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2025.

Fundação Getúlio Vargas (FGV). **O setor de carnes no Brasil e suas interações com o comércio internacional**. Disponível em: https://agro.fgv.br/sites/default/files/2023-03/03_Setor_Carnes_Brasil_PT.pdf. Acesso em: 10 nov. 2024.

GHG Protocol. Greenhouse Gas Protocol. **The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard**. Washington, USA, 2004. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2025.

Global Dairy Platform (GDP). **Global Dairy Platform Annual Review**. 2018. p. 1-20. Disponível em: <https://www.globaldairyplatform.com/wp-content/uploads/2018/04/gdp-annual-report-online.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2024.

Gomes, C. S. Impactos da expansão do agronegócio brasileiro na conservação dos recursos naturais. **Cadernos do Leste**, Belo Horizonte, v. 19, n. 19, jan./dez. 2019. Disponível em:

<https://periodicos.ufmg.br/index.php/caderleste/article/view/13160/10396>. Acesso em: 28 nov. 2024.

Hammond, K. J.; Crompton, L. A.; Bannik, A.; Dijkstra, J.; Yáñez-Ruiz, D. R.; O’Kiely, P.; Kebreab, E.; Eugène, M. A.; Yu, Z.; Shingfield, K. J.; Schwarm, A.; Hristov, A. N.; Reynolds, C. K. Review of current in vivo measurement techniques for quantifying enteric methane emission from ruminants. **Animal Feed Science and Technology**, [S.l.], v. 219, p. 13-30, set. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.05.018>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Haraguchi, F. K.; Abreu, W. C. de; De Paula, H. Proteínas do soro do leite: composição, propriedades nutricionais, aplicações no esporte e benefícios para a saúde humana. **Revista de Nutrição**, Campinas, v. 19, n. 4, p. 479-488, jul./ago. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-52732006000400007>. Acesso em: 06 dez. 2024.

Harris, S.A.; French, H.M.; Heginbottom, J. A.; Johnston, G. H.; Ladanyi, B.; Sego, D. C.; van Everdingen, R. O. **Glossary of Permafrost and Related GroundIce Terms**. Technical Memorandum No. 142. Permafrost Subcommittee, Committee on Geotechnical Research, National Research Council of Canada, 1988. Disponível em: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=69fb8993-1baa-4225-b33a-6a02341d383d>. Acesso em: 25 nov. 2024.

Hood, M.; Broadgate, W.; Urban, E. Gaffney, O. **Acidificação oceânica**. 2009. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000192223>. Acesso em: 25 nov. 2024.

Houghton, J. T.; Ding, Y.; Griggs, D. J.; Noguer, M.; van der Linden, P. J.; Dai, X.; Maskell, K.; Johnson, C. A. **Climate Change 2011: The Scientific Basis**. Cambridge University Press, Cambridge, UK e New York, USA, 881 p. 2001. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGI_TAR_full_report.pdf. Acesso em: 12 nov. 2024.

Iamaguti, J. L.; Moitinho, M. R.; Teixeira, D. D. B.; Bicalho, E. da S.; Panosso, A. R.; La Scala Junior, N. Preparo do solo e emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo em área canavieira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 19, n. 5, p. 497-504, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p497-504>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Estatística da produção pecuária**: primeiros resultados, jan.-mar. 2023. 2023a. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3087/epp_pr_2023_1tri.pdf. Acesso em: 02 dez. 2024.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Estatística da produção pecuária**: primeiros resultados, abr.-jun. 2023. 2023b. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3087/epp_pr_2023_2tri.pdf. Acesso em: 02 dez. 2024.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Estatística da produção pecuária**: primeiros resultados, jul.-set. 2023. 2023c. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3087/epp_pr_2023_3tri.pdf. Acesso em: 02 dez. 2024.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Produção de leite – Brasil**. 2024d. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/leite/br>. Acesso em: 23 jan. 2025.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Produção de leite – Paraná**. 2024f. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/leite/pr>. Acesso em: 23 jan. 2025.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Produção de leite – São Paulo**. 2024g. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/leite/sp>. Acesso em: 27 jan. 2025.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Tabela 6912**. 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6912>. Acesso em: 06 dez. 2024.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Annex VII: Glossary [Matthews, J.B.R., V. Möller, R. van Diemen, J.S. Fuglestvedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, A. Reisinger (eds.)]. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, Connors, S. L.; Péan, C.; Berger, S.; Caud, N.; Chen, Y.; Goldfarb, L.; Gomis, M. I.; Huang, M.; Leitzell, K.; Lonnoy, E.; Matthews, J. B. R.; Maycock, T. K.; Waterfield, T.; Yelekçi, O.; Yu, R.; Zhou, B. (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021a. p. 2215–2256. *E-book*. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1017/9781009157896.022>. Acesso em: 29 jul. 2025.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, Connors, S. L.; Péan, C.; Berger, S.; Caud, N.; Chen, Y.; Goldfarb, L.; Gomis, M. I.; Huang, M.; Leitzell, K.; Lonnoy, E.; Matthews, J. B. R.; Maycock, T. K.; Waterfield, T.; Yelekçi, O.; Yu, R.; Zhou, B. (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021b. p. 3–32. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.00>. Acesso em: 29 jul. 2025.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **Global Warming of 1.5°C**. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge University Press, Cambridge, UK e New York, USA, 616 p. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157940>. Acesso em: 12 nov. 2024

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese**. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Sexto Relatório

de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. IPCC, Genebra, Suíça, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport_PO.pdf. Acesso em: 12 maio 2025.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **O Oceano e a Criosfera em um Clima em Mudança**: Um Relatório Especial do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Sumário para Formadores de Políticas. 2019. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2020/11/SROCC_SPM_Portuguese.pdf. Acesso em: 15 nov. 2024.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (IBAMA). **Protocolo de Montreal**. fev. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/protocolo-de-montreal#sobre-protocolo-montreal>. Acesso em: 05 maio 2025.

ISO 14040. **Environmental management – Life Cycle Assessment**: Principles and framework. Geneva: International Organization for Standardization (ISO). Disponível em: <https://www.cscses.com/uploads/2016328/20160328110518251825.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2025.

Jones, M. W.; Peters, G. P.; Gasser, T.; Andrew, R. M.; Schwingshackl, C.; Gütschow, J.; Houghton, R. A.; Friedlingstein, P.; Pongratz, J.; Le Quéré, C. National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850. **Scientific Data**, [S. l.], v. 10, n. 1, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02041-1>. Acesso em: 30 jul. 2025.

Kigali. **Emenda de Kigali**: benefícios para o Brasil e o mundo. 2018. Disponível em: https://kigali.org.br/wp-content/uploads/2023/01/fact_sheet_idec_2018.pdf. Acesso em: 17 abr. 2025.

Kumar, P. Green Revolution and its Impact on Environment. **International Journal of Research in Humanities e Social Sciences**, [S. l.], v. 5, n. 3, mar. 2017. Disponível em: https://www.raijmr.com/ijrhs/wp-content/uploads/2017/11/IJRHS_2017_vol05_issue_03_08.pdf. Acesso em: 15 maio 2025.

Kuyah, S.; Thiong'o, M.; Abwanda, S.; Mutuo, P. M.; Aynekulu, E.; Rosenstock, T. S. Module I. Introduction to Greenhouse Gases. In: Kuyah, S.; Thiong'o, M.; Abwanda, S.; Mutuo, P. M.; Aynekulu, E.; Rosenstock, T. S. **Measuring Greenhouse Gas Emissions, Carbon Stocks and Stock Changes in Smallholder Farming Systems: A Training Manual**. p. 1-8. 2016. Disponível em: <https://www.cifor-icraf.org/publications/downloads/Publications/PDFS/MN16217.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2025.

Lahlali, R.; Taoussi, M.; Laasli, S.-E.; Gachara, G.; Ezzouggari, R.; Belabess, Z.; Aberkani, K.; Assouguem, A.; Meddich, A.; El Jarroudi, M.; Barka, E. A. Effects of climate change on plant pathogens and host-pathogen interactions. **Crop and Environment**, [S. l.], v. 3, n. 3, set. 2024, p. 159-170. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.crope.2024.05.003>. Acesso em: 14 maio 2025.

Lasco, R. D.; Ogle, S.; Raison, J.; Verchot, L.; Wassmann, R.; Yagi, K.; Bhattacharya, S.; Brenner, J. S.; Daka, J. P.; González, S. P.; Krug, T.; Li, Y.; Martino, D. L.; McConkey, B. G.; Smith, P.; Tyler, S. C.; Zhakata, W.; Sass, R.; Yan, X. Chapter 5: Cropland. In: Eggleston, S.; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T.; Tanabe, K. **Agriculture, Forestry and Other Land Use**. v. 4. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006. IGES, Japão. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_05_Ch5_Cropland.pdf. Acesso em: 29 nov. 2024.

Lazzari, F. M.; Souza, A. S. Revolução verde: impactos sobre os conhecimentos tradicionais. In: Congresso Internacional de Direito e Contemporaneidade, 4. 2017, Santa Maria - RS. **Anais [...]**. Santa Maria - RS: UFSM - Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/congressodireito/anais/2017/4-3.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2024.

Leal, G. C. S. de; Farias, M. S. S. de; Araujo, A. de F. O processo de industrialização e seus impactos no meio ambiente urbano. **QUALIT@S Revista Eletrônica**, [S. l.], v. 7, n. 1, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.18391/QUALITAS.V7I1.128>. Acesso em: 23 jan. 2025.

Lima, E. C. de; Oliveira Neto, C. R. de. Revolução Industrial: considerações sobre o pioneirismo industrial inglês. **Revista Espaço Acadêmico**, [S. l.], v. 17, n. 194, p. 102-113, 6 jul. 2017. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/EspacoAcademico/article/download/32912/19746/>. Acesso em: 20 set. 2024.

Lin, C.-H.; Grant, R. H.; Heber, A. J.; Johnston, C. T. Application of open-path Fourier transform infrared spectroscopy (OP-FTIR) to measure greenhouse gas concentrations from agricultural fields. **Atmospheric Measurement Techniques**, [S. l.], v. 12, n. 6, p. 3403-3415, jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/amt-12-3403-2019>. Acesso em: 18 jun. 2025.

Lindsey, R. **Climate Change: Global Sea Level**. National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA. Disponível em: [https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level#:~:text=The%20rising%20water%20level%20is,record%20\(1993%2Dpresent\)](https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level#:~:text=The%20rising%20water%20level%20is,record%20(1993%2Dpresent).). Acesso em: 22 nov. 2024.

Machado, C.R. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de exposição ao ar**. 2011. 51 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/c5571bdd-5a46-459f-ab58-612517ef3b44/content>. Acesso em: 29 jan. 2025.

Machado, P. L. O. de A.; Ferreira, C. M.; Carvalho, M. T. de M.; Silva, M. A. S. da; Madari, B. E. A. Agropecuária como parte da solução do problema. In: Machado, P. L. O. de A.; Ferreira, C. M.; Carvalho, M. T. de M.; Silva, M. A. S. da; Madari, B. E. A. **Mudança do clima e a agropecuária brasileira: noções, mitigação e adaptação**. Santo Antônio de Góias: Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 322. 2022. p. 19-22.

Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1148256>. Acesso em: 28 nov. 2024.

MacSween, K.; Feliciano, D. Comparison of online greenhouse gas accounting tools for agriculture. **CCAFS INFO NOTE**, [S. l.], dez. 2018. Disponível em: <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/bbc258e6-7397-469f-8981-2535507a6994/content>. Acesso em: 25 jan. 2024.

Magalhães, R.; Vendramini, A. Os impactos da quarta revolução industrial. **GV Executivo**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 40-43, jan.- fev. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.12660/gvexec.v17n1.2018.74093>. Acesso em: 01 nov. 2024.

Maslin, M. What is global warming?. In: Maslin, M. **Global Warming: A Very Short Introduction**. New York: Oxford University Press Inc., 2004. p. 4-22. Disponível em: https://schritte.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/05/global_warming_introduction.pdf. Acesso em: 22 nov. 2024

Massruhá, S. M. F. S.; Leite, M. A. de A. Agro 4.0 - Rumo à Agricultura Digital. In: Magnoni Júnior, L.; Stevens, D.; Silva, W. T. L. da; Vale, J. M. F. do; Purini, S. R. de M.; Magnoni, M. da G. M.; Sebastião, E.; Adorno Filho, E. F.; Figueiredo, W. dos S.; Sebastião, I. **JC na Escola Ciência, Tecnologia e Sociedade: Mobilizar o Conhecimento para Alimentar o Brasil**. 2ª ed. São Paulo: Centro Paula Souza, 2017. p. 28-35. Disponível em: <https://www.agbbauru.org.br/publicacoes/Mobilizar2ed/pdf/Mobilizar2ed-completa.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2024.

McGinn, S. M. Measuring greenhouse gas emissions from point sources in agriculture. **Canadian Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 86, n. 3, p. 355-371, maio 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.4141/S05-099>. Acesso em: 16 jun. 2025.

MilkPoint. **Levantamento Top 100 2024**. 2024. Disponível em: https://www.milkpoint.com.br/top100/top100-2024.pdf?utm_source=top+100&utm_medium=download&utm_campaign=download+top+100&utm_term=pdf&utm_content=top100-2024.pdf. Acesso em: 24 jan. 2025.

Miller, G. T.; Spoolman, S. E. Environmental Worldviews, Ethics, and Sustainability. In: Miller, G. T.; Spoolman, S. E. **Living in the Environment**. 2018. p. 680-699. Disponível em: <https://www.cengage.com/c/living-in-the-environment-19e-miller-spoolman/9781337094153/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Tecnologias para o aproveitamento econômico dos resíduos de bovinos. In: Brasil, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. **Pecuária de baixa emissão de carbono**: Tecnologias de produção mais limpa e aproveitamento econômico dos resíduos da produção de bovinos de corte e leite em sistemas confinados. 1ª ed. Brasília: MAPA, 2018. p. 43-60. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/projeto-pecuaria-abc/arquivos-publicacoes/cartilhacarbonoweb.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2024.

Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovações (MCTI); Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). **Efeito estufa e a convenção sobre**

mudança do clima. *In:* Ministério da Ciência e Tecnologia : Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Introdução. p. 4-7. 1999. Disponível em: <https://repositorio.mcti.gov.br/handle/mctic/5161>. Acesso em: 04 nov. 2024.

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). **Resultados do Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa por Unidade Federativa.** 2022b. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/LO_GIZ_RESULTADOINVENTARIO_00_PAGINASINDIVIDUALScompactado.pdf. Acesso em: 05 maio 2025.

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Setor Agropecuária. *In:* Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil.** 6ª ed. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicação, 2022a. p. 25-35. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-aneais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-aneais.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2024.

Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC). Introdução. *In:* Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC). **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa - GEE.** p. 4-6. 2009. Disponível em: https://www.gov.br/suframa/pt-br/publicacoes/copy_of_InventriodeEmissesdeGasesEfeitoEstufaGEE.pdf. Acesso em: 08 nov. 2024.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). Mudança do clima observada e futura. *In:* Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima:** volume 1: Estratégia Geral. Portaria MMA nº 150 de 10 de maio de 2016. Brasília : MMA, 2016. p. 10-17. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biomas-e-ecossistemas/biomas/arquivos-biomas/plano-nacional-de-adaptacao-a-mudanca-do-clima-pna-vol-i.pdf>. Acesso em: 12 maio 2025.

Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Clima e Relações Internacionais. Introdução. *In:* Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Clima e Relações Internacionais. **Guia Orientativo:** gerenciamento e destinação final ambientalmente adequada de resíduos de substâncias que destroem o ozônio (SDOs). Brasília, DF: MMA, 2022. p. 12-15. Disponível em: https://www.protocolodemontreal.org.br/site/images/publicacoes/guia_orientativo/GUIA_ORIENTATIVO_Gerenciamento_SDOs_FINAL.pdf.

Ministério da Saúde (MS), Secretaria de Atenção à Saúde, Departamento de Atenção Básica. O Guia Alimentar para a População Brasileira: Seus Princípios e suas Diretrizes e os Atributos da Alimentação Saudável. *In:* Ministério da Saúde (MS), Secretaria de Atenção à Saúde, Departamento de Atenção Básica. **Guia Alimentar para a População Brasileira:** Promovendo a Alimentação Saudável. 1ª ed. Brasília: Ministério da Saúde, 2008. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/guia_alimentar_populacao_brasileira_2008.pdf. Acesso em: 06 dez. 2024.

Mitchell, J. F. B. The “Greenhouse” Effect and Climate Change. **Reviews of Geophysics**, [S.l.], v. 27, n. 1, fev. 1989, p. 115-139. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/RG027i001p00115>. Acesso em: 04 nov. 2024.

Moitinho, M. R. **Variabilidade da emissão de CO₂ do solo sob diferentes manejos em áreas de cana-de-açúcar**. 2017. 126 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/150110>. Acesso em: 18 jun. 2025.

Mumu, N. J.; Ferdous, J.; Müller, C.; Ding, W.; Zaman, M.; Jahangir, M. M. R. Methodological progress in the measurement of agricultural greenhouse gases. **Carbon Management**, [S.l.], v. 15, n. 1, jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17583004.2024.2366527>. Acesso em: 16 jun. 2025.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Centers for Environmental Information. **Global Climate Report for Annual 2023**. 2024b. Disponível em: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202313>. Acesso em: 22 nov. 2024.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Centers for Environmental Information. **Global Climate Report for Annual 2024**. 2025. Disponível em: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202413>. Acesso em: 16 maio 2025.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). **The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)**. 2024a. Disponível em: <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>. Acesso em: 07 nov. 2024.

National Aeronautics and Space Administration (NASA); NASA’s Goddard Institute for Space Studies - GISS. **Global temperature**. 2023. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/?intent=121>. Acesso em: 22 nov. 2024.

Nugrahaeningtyas, E.; Jeong, S.-H.; Novianty, E.; Ataallahi, M.; Park, G. W.; Park, K.-H. Measurement of greenhouse gas emissions from dairy cattle barn in Korea. **Journal of Animal Science and Technology**, [S.l.], v. 65, n. 2, p. 459-472, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5187/jast.2023.e25>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Octaviano, C. Muito além da tecnologia: os impactos da Revolução Verde. **ComCiência**, Campinas, [S.l.], n. 120, 2010. Disponível em: <http://comciencia.scielo.br/pdf/cci/n120/a06n120.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2024.

Oliveira, G. S. de.; Silva, N. F. da; Henriques, R. Capítulo 3: Evolução da humanidade e do clima. In: Oliveira, G. S. de.; Silva, N. F. da; Henriques, R. **Mudanças climáticas: ensino fundamental e médio**. Brasília: MEC, SEB; MCT; AEB, 2009. Disponível em: https://www.gov.br/aeb/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/material_educacional/apostilas-pdf/8vol13_mc_04mai09.pdf. Acesso em: 25 nov. 2024.

Oliveira, S. F.; Prado, R. B.; Monteiro, J. M. G. Impactos das mudanças climáticas na produção agrícola e medidas de adaptação sob a percepção de atores e produtores rurais de Nova Friburgo, RJ. **Interações**, Campo Grande, MS, v. 23, n. 4, p. 1179-1201, out./dez. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20435/inter.v23i4.3548>. Acesso em: 13 maio 2025.

Olivo, A. J.; Godber, O. F.; Reed, K. F.; Nydam, D. V.; Wattiaux, M. A.; Ketterings, Q. M. Greenhouse gas emissions and nutrient use efficiency assessment of 6 New York organic dairies. **Journal of Dairy Science**, [S.l.], v. 107, n. 11, p. 9527-9548, nov. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25004>. Acesso em: 17 jun. 2025.

Onhinam, S. F. **Alterações climáticas e seus impactos na agricultura e oferta de alimentos**: uma revisão sistemática da literatura. 2022. 39 f. Monografia (Curso de Ciências Biológicas, Instituto de Ciências Exatas e da Natureza) - Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unilab.edu.br/jspui/bitstream/123456789/4312/1/SIOZIMILA%20FERNANDES%20ONHINAM.pdf>. Acesso em: 13 maio 2025.

Organização das Nações Unidas (ONU) Brasil. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Traduzido pelo Centro de Informação das Nações Unidas para o Brasil (UNIC Rio). 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2025.

Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), Food and Agriculture Organization (FAO). Executive Summary. In: Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), Food and Agriculture Organization (FAO). **OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032**. Paris: OECD Publishing. 2023. p. 17-19. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/08801ab7-en>. Acesso em: 06 dez. 2024.

Pandolfo, C.; Massignan, A. M.; Braga, H. J.; Fazio, V. S. Aquecimento global e seus impactos no zoneamento climático da macieira de média exigência de frio na região Sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, [S.l.], v. 20, n. ½, p. 131-137, dez. 2014. Disponível em: <https://revistapag.agricultura.rs.gov.br/ojs/index.php/revistapag/article/view/104/80>. Acesso em: 12 maio 2025.

Pasquini, N. C. Revoluções Industriais: uma abordagem conceitual. **Revista Tecnológica da Fatec Americana**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 29-44, 8 ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.47283/244670492020080129>. Acesso em: 01 nov. 2024.

Perasso, V. O que é a 4ª revolução industrial - e como ela deve afetar nossas vidas. **BBC NEWS Brasil**, 22 out. 2016. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-37658309>. Acesso em: 01 nov. 2024.

Pereira, L. A.; Pereira, M. C. T.; Brito, L. T. de L.; Melo, R. F. de; Camargo, A. F. M. A agricultura e suas relações com o ambiente. In: Brito, L. T. de L.; Melo, R. F. de; Giongo, V. (ed.). **Impactos ambientais causados pela agricultura no Semiárido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010, p. 13-29. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/875476>. Acesso em: 15 maio 2025.

Pereira, V. F. F. **Dióxido de Carbono e Clima**. 2023. 35 f. Dissertação (Mestrado em História e Filosofia das Ciências) - Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, 2024. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10451/62586>. Acesso em: 08 nov. 2024.

Perez, F. F.; Fontela, M.; García-Ibáñez, M.; Mercier, H.; Velo, A.; Lherminier, P.; Zunino, P.; de la Paz, M.; Alonso-Pérez, F.; Guallart, E. F.; Padin, X. A. Meridional overturning circulation conveys fast acidification to the deep Atlantic Ocean. **Nature**. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature25493>. Acesso em: 6 nov. 2024.

Pinê, R.; Pinheiro, R.; Chadouteaud, L.; Américo, G. Mudanças climáticas: o efeito estufa e a produção agrícola. **ANAP Brasil**, v. 7, n. 9, p. 51-61, dez. 2014. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/anap_brasil/article/download/1115/1137/2240. Acesso em: 01 nov. 2024.

Pinto, J. A.; Barros, R. M.; Santos, I. F. S. dos; Tiago Filho, G. L.; Botan, M. C. de O.; Vilas Bôas, T. F.; Crispim, A. M. de C. Study of the anaerobic co-digestion of bovine and swine manure: Technical and economic feasibility analysis. **Cleaner Waste Systems**, [S. l.], v. 5, ago. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100097>. Acesso em: 27 jan. 2025.

Pott, C. M.; Estrela, C. C. Histórico ambiental: desastres ambientais e o despertar de um novo pensament. **Estudos Avançados**, [S. l.], v. 31, n. 89, jan.-abr. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-40142017.31890021>. Acesso em: 01 nov. 2024.

Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). O que é Consumo e Produção Sustentável?. In: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). **ABC do CPS: Esclarecendo Conceitos Sobre Consumo e Produção Sustentável (CPS)**. p. 12-14. Disponível em: https://www.oneplanetnetwork.org/sites/default/files/10yfp-abc_of_scp-pt.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.

Programa Estadual de Prevenção à Destruição da Camada de Ozônio (PROZONESP); Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB); Secretaria do Meio Ambiente (SMA). Introdução. In: Programa Estadual de Prevenção à Destruição da Camada de Ozônio - PROZONESP; Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB; Secretaria do Meio Ambiente (SMA). Introdução. **Aspectos gerais sobre a proteção da camada de ozônio coletânea de informações**. 2005. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/server/api/core/bitstreams/1fc04e3d-634f-4b29-aafe-b90f96d5259e/content>. Acesso em: 08 nov. 2024.

Raza, M. M.; Bebbber, D. P. Climate change and plant pathogens. **Current Opinion in Microbiology**, [S. l.], v. 70, dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mib.2022.102233>. Acesso em: 14 maio 2025.

Rocha, B. A. B.; Lima, F. R. de S.; Waldman, R. L. Mudanças no papel do indivíduo pós-revolução industrial e o mercado de trabalho na sociedade da informação. **Revista**

Pensamento Jurídico, São Paulo, v. 14, n. 1, jan.-jul. 2020. Disponível em: <https://ojs.unialfa.com.br/index.php/pensamentojuridico/article/view/419/326>. Acesso em: 25 nov. 2024.

Sales, J. R. da S.; Barros, V. da S.; Lacerda, C. F. de; Figueirêdo, M. C. B. de; Lima, A. F. da S.; Correa-Guimaraes, A. Quantification of GHG Emissions Using Different Methodologies in Tropical Conventional Cashew Cultivation. **Sustainability**, v. 17, n. 7, mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17073042>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Sambuichi, R. H. R.; Oliveira, M. C.; Silva, A. P. M.; Luedemann, G. 2012. **A sustentabilidade ambiental da agropecuária brasileira: impactos, políticas públicas e desafios**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), Rio de Janeiro. (Texto para Discussão 1782). Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1050/1/TD_1782.pdf. Acesso em: 26 jul. 2022.

Sands, R. D.; Meade, B.; Seale, Jr. L.; Robinson, S.; Seeger, R. **Scenarios of Global Food Consumption**: Implications for Agriculture, report n. ERR-323. U. S. Department of Agriculture, Economic Research Service. Disponível em: <https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/107474/err-323.pdf?v=3280.2>. Acesso em: 29 nov. 2024.

Schmithausen, A. J.; Trimborn, M.; Büscher, W. Methodological Comparison between a Novel Automatic Sampling System for Gas Chromatography versus Photoacoustic Spectroscopy for Measuring Greenhouse Gas Emissions under Field Conditions. **Sensors**, [S.l.], v. 16, n. 10, out. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s16101638>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Scwinzekel, N.; Cavalli, L.; Robl, N. D.; Melo, P. Z.; Godoy, T. de M. Os impactos ambientais da revolução industrial: mudanças econômicas e sociais. Unijui, MoEduCiTec. 2022. Disponível em: <https://www.publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/moeducitec/article/download/22652/21173>. Acesso em: 03 nov. 2024.

Shan, C.; Wang, W.; Zeng, X.; Xie, Y.; Hu, Q.; Qian, Z.; Liu, C. The total column of CO₂ and CH₄ observed in Nyingchi, Tibet, based on the ground-based portable FTIR. **Atmospheric Environment**, [S.l.], v. 356, set. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2025.121241>. Acesso em: 18 jun. 2025.

Shetty, N.; Difford, G.; Lassen, J.; Løvendahl, P.; Buitenhuis, A. J. Predicting methane emissions of lactating Danish Holstein cows using Fourier transform mid-infrared spectroscopy of milk. **Journal of Dairy Science**, [S.l.], v. 100, n. 11, p. 9052-9060, nov. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13014>. Acesso em: 18 jun. 2025.

Shkembi, B.; Huppertz, T. Calcium Absorption from Food Products: Food Matrix Effects. **Nutrients**, [S.l.], v. 14, n. 1, p. 1-31, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nu14010180>. Acesso em: 06 dez. 2024.

Silva, D. A. P. da; Campos, M. C. C.; Mantovanelli, B. C.; Santos, L. A. C. do; Soares, M. D. R.; Cunha, J. M. da. Variabilidade espacial da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo em área de pastagem na região Amazônica, Brasil. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, SC, v. 18, n. 1, p. 119-126, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5965/223811711812019119>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Silva, V. B. da; Crispim, J. de Q. Um breve relato sobre a questão ambiental. **Revista GEOMAE**, [S. l.], v. 2, n. 1, 2011. Disponível em: <https://periodicos.unespar.edu.br/geomae/article/view/5777/3801>. Acesso em: 23 jan. 2025.

Singh, B. K.; Delgado-Baquerizo, M.; Egidi, E.; Guirado, E.; Leach, J. E.; Liu, H.; Trivedi, P. Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. **Nature Reviews Microbiology**, [S. l.], v. 21, p. 640-656, maio 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7>. Acesso em: 14 maio 2025.

Sodré, C. F. L.; Silva, Y. J. A. da; Monteiro, I. P. Acidificação dos Oceanos: fenômeno, consequências e necessidade de uma Governança Ambiental Global. **Revista Científica do Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável da UNDB**, [S. l.], v. 1, n. 4, jan. jul. 2016. Disponível em: http://sou.undb.edu.br/public/publicacoes/artigo_acidifica%C3%83%C2%A7%C3%83%C2%A3o_dos_oceanos_-_camilla_fernanda_lima_sodr%C3%83%C2%A9.pdf. Acesso em: 25 nov. 2024.

Souza, L. C. de. **Emissão de CO₂ do solo associada à escarificação em Latossolo e em Argissolo**. 2017. 77 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/149881>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Sukhoveeva, O. E. Carbon Calculators as a Tool for Assessing Greenhouse Gas Emissions from Livestock. **Doklady Earth Sciences**, [S. l.], v. 497, p. 266-271. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1134/S1028334X21030119>. Acesso em: 17 jun. 2025.

Sykes, A. J.; Topp, C. F. E.; Wilson, R. M.; Reid, G.; Rees, R. M. A comparison of farm-level greenhouse gas calculators in their application on beef production systems. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 164, p. 398-409, out. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.197>. Acesso em: 17 jun. 2025.

Universidade de São Paulo (USP). Food Research Center (FoRC). **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TBCA)**. Versão 7.2. São Paulo, 2023. Disponível em: <http://www.fcf.usp.br/tbca>. Acesso em: 05 dez. 2024.

Tanure, T. M. do P. **Mudanças climáticas e agricultura no Brasil**: impactos econômicos regionais e por cultivo familiar e patronal. 257f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional da Faculdade de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/33870>. Acesso em: 13 maio 2025.

Távora, F. L.; França, F. F.; Lima, J. R. P. de A. **Impactos das Mudanças Climáticas na Agropecuária Brasileira, Riscos Políticos, Econômicos e Sociais e os Desafios para a Segurança Alimentar e Humana**. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, dez. 2022 (Texto para Discussão nº313). p. 24-26. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td313>. Acesso em: 13 maio 2025.

Taylor, A. M.; Amiro, B. D.; Tenuta, M.; Gervais, M. Direct whole-farm greenhouse gas flux measurements for a beef cattle operation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [S.l.], v. 239, p. 65-79, fev. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.011>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Thorstensen, V.; Zuchieri, A. M. **OCDE e a agricultura: meio ambiente e mudança climática**. Working Paper 555, CCGI n. 39, nov. 2021. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10438/31317>. Acesso em: 26 nov. 2024.

Thumba, D. A.; Lazarova-Molnar, S.; Niloofar, P. Comparative evaluation of data requirements and level of decision support provided by decision support tools for reducing livestock-related greenhouse gas emissions. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 373, nov. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133886>. Acesso em: 17 jun. 2025.

Tolentino, M.; Rocha-Filho, R. C. A química no efeito estufa. **Química Nova na Escola**, [S.l.], n. 8, nov. 1998. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc08/quimsoc.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2024.

United Nations (UN), Department of Economic and Social Affairs, Population Division (UNDESA). **World Population Prospects 2019: Highlights**. New York: United Nations. 2019. Disponível em: https://population.un.org/wpp/assets/Files/WPP2019_Highlights.pdf. Acesso em: 29 nov. 2024.

United Nations (UN). General Assembly – **Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015**. Disponível em: <https://docs.un.org/en/A/RES/70/1>. Acesso em: 14 mar. 2025.

United Nations (UN). Treaty Series. **Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer (with annex)**. Montreal: United Nations. 1987. Publicação nº 26369 Disponível em: <https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%201522/volume-1522-I-26369-English.pdf>.

United Nations (UN). **World Population Prospects 2024: Summary of Results**. New York: United Nations. 2024. Disponível em: https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2024_Summary_of_Results.pdf. Acesso em: 29 nov. 2024.

United Nations Environment Programme, Ozone Secretariat, The Secretariat for the Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer and for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. **Handbook for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer**. 14^a ed. 2020. Disponível em:

<https://ozone.unep.org/sites/default/files/Handbooks/MP-Handbook-2020-English.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2025.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). **Article 1: Definitions**. 1992. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

United States Department of Agriculture (USDA). **Production**. 2024. Disponível em: <https://fas.usda.gov/data/production/country/br>. Acesso em: 29 nov. 2024.

United States Environmental Protection Agency (EPA). **Frequently Asked Questions About Global Warming and Climate Change: Back to Basics**. EPA, abr. 2009. Disponível em: https://archive.epa.gov/epa/production/files/2016-07/documents/climate_basics.pdf. Acesso em: 22 nov. 2024.

van Dijk, M.; Morley, T.; Rau, M. L.; Saghai, Y. A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010-2050. **Nature Food**, [S. l.], v. 2, jul. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9>. Acesso em: 29 nov. 2024.

van Gastelen, S.; Antunes-Fernandes, E. C.; Hettinga, K. A.; Dijkstra, J. Relationships between methane emission of Holstein Friesian dairy cows and fatty acids, volatile metabolites and non-volatile metabolites in milk. **Animal**, [S. l.], v. 11, n. 9, p. 1539-1548, set. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S1751731117000295>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Vetter, S. H.; Malin, D.; Smith, P.; Hillier, J. The potential to reduce GHG emissions in egg production using a GHG calculator – A Cool Farm Tool case study. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 202, p. 1068-1076, nov. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.199>. Acesso em: 17 jun. 2025.

Wecking, A. R.; Wall, A. M.; Liáng, L. L.; Lindsey, S. B.; Luo, J.; Campbell, D. I.; Schipper, L. A. Reconciling annual nitrous oxide emissions of an intensively grazed dairy pasture determined by eddy covariance and emission factors. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [S. l.], v. 287, jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106646>. Acesso em: 19 jun. 2025.

World Health Organization - WHO. **What is the greenhouse effect and why should I be able to explain it to others?**. Heat Waves, floods and the health impacts of climate change: A Prototype Training Workshop for City Officials. 2010. Disponível em: https://extranet.who.int/kobe_centre/sites/default/files/pdf/2010datasheets.pdf. Acesso em: 07 nov. 2024.

Wilson, J.; Law, S. O efeito estufa e a história do carbono. In: Wilson, J.; Law, S. **Um Breve Guia sobre Aquecimento Global**. Tradução de Patricia Zimbres. Brasília: Fundação Alexandra de Gusmão, 2010 p. 23-34. Disponível em: https://funag.gov.br/loja/download/651-Um_Breve_Guia_sobre_aquecimento_Global.pdf. Acesso em: 12 nov. 2024.

Witkowska, D.; Korczyński, M.; Koziel, J. A.; Sowińska, J.; Chojnowski, B. The effect of dairy cattle housing systems on the concentrations and emissions of gaseous mixtures in barns determined by Fourier-Transform Infrared Spectroscopy. **Annals of Animal**

Science, [S.l.], v. 20, n. 4, p. 1487-1507, out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.2478/aoas-2020-0039>. Acesso em: 18 jun. 2025.

Xavier, C. V. **Sucessão e rotação de culturas em sistema de semeadura direta: implicações na emissão de CO₂ e atributos do solo**. 2018. 91 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/180832>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Zhou, A.; Yuan, C. Global warming intensifies once-in-a-decade extreme precipitation in summer in China. **Atmospheric and Oceanic Science Letters**, [S.l.], out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2024.100561>. Acesso em: 22 nov. 2024.

4 OBJETIVOS

Neste estudo buscou-se estimar as emissões de gases de efeito estufa e relacioná-las com as características de produção de fazendas leiteiras.

CAPÍTULO II

EMISSÕES E CARACTERIZAÇÃO DE GASES DE EFEITO
ESTUFA - GEE EM PROPRIEDADES LEITEIRAS DOS
ESTADOS DO PARANÁ E SÃO PAULO, UTILIZANDO A
FERRAMENTA *COOL FARM TOOL* - CFT¹

¹ Artigo a ser submetido ao periódico *Journal of Cleaner Production*.

RESUMO

A produção leiteira é essencial, nutricional e econômica, mas enfrenta desafios ambientais, sendo fonte significativa de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE). Frente às mudanças climáticas e ao crescimento populacional, torna-se importante mensurar e mitigar as emissões desses gases na agropecuária. Neste estudo buscou-se estimar as emissões de gases de efeito estufa e relacioná-las com as características de produção de fazendas leiteiras. Para tanto, foram analisadas 19 fazendas leiteiras nos Estados do Paraná e de São Paulo, tendo como instrumento de coleta de dados a ferramenta *Cool Farm Tool* (CFT). Os resultados foram analisados e discutidos de forma comparativa entre as propriedades amostradas. As seguintes hipóteses foram definidas: H1 - fazendas que apresentam maior volume de produção de leite, emitem menor quantidade de GEE por litro de leite corrigido para gordura e proteína (kg CO₂e/kg FPCM), e H2 - o padrão genético dos animais impacta nas emissões de GEE (kg CO₂e/kg FPCM). Os resultados indicaram que a fazenda com maior volume de produção de leite e maior rebanho apresentou maior emissão total de GEE (kg CO₂e). Porém, esta mesma fazenda foi a segunda de menor emissão de GEE por litro de leite corrigido (kg CO₂e/kg FPCM). Esse resultado permite a aceitação da H1 definida nesta pesquisa, constatando que o volume de produção de leite dilui a emissão total de GEE por litro de leite corrigido para gordura e proteína (kg CO₂e/kg FPCM). O maior valor obtido para emissões de GEE em (kg CO₂e/kg FPCM) foi constatado em propriedade que utiliza a raça Jersey, que produz leite com maior teor de gordura, o que pode fundamentar a hipótese H2 definida nesta pesquisa. Com os dados obtidos, é possível orientar os produtores na adoção de práticas mais sustentáveis, contribuindo para a Agenda 2030 e para a mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Aquecimento global; Ferramentas de avaliação; Pecuária leiteira e Sustentabilidade.

ABSTRACT

Dairy farming is essential, nutritionally and economically, but it poses environmental challenges and contributes significantly to greenhouse gas (GHG) emissions. In the context of climate change and population growth, it is crucial to measure and reduce these emissions in agriculture. This study aimed to estimate greenhouse gas emissions and relate them to the production characteristics of dairy farms. To this end, data on 19 dairy farms in the Brazilian states of Paraná and São Paulo were collected using the Cool Farm Tool (CFT). The results were analyzed and discussed in a comparative manner between the sampled farms. The following hypotheses were defined: H1 - Farms with a higher milk production volume emit fewer GHGs per liter of milk corrected for fat and protein (kg CO₂e/kg FPCM); and H2 - The genetic standard of the animals impacts GHG emissions (kg CO₂e/kg FPCM). The results showed that farm with the highest milk production volume and largest herd had the highest total GHG emissions (kg CO₂e). However, this same one had the second lowest GHG emissions per liter of corrected milk. This result allows us to accept H1, which is defined in this research and shows that the volume of milk production dilutes total GHGs emissions per liter of milk, corrected for fat and protein content (kg CO₂e/kg FPCM). The highest value for GHG emissions (kg CO₂e/kg FPCM) was found on a property raising the Jersey breed, which produces milk with a higher fat content. This supports the H2 hypothesis defined in this research. The data obtained can be used to guide producers in adopting more sustainable practices, thereby contributing to the 2030 Agenda and mitigating the impacts of climate change.

Keywords: Assessment tools; Dairy; Global warming; and Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

O leite e seus derivados são essenciais na alimentação humana pelo alto teor de cálcio, proteína e energia, sendo consumidos regularmente por cerca de seis bilhões de pessoas. A importância deste alimento não está só em seu fator nutricional, mas também no econômico, visto que o Brasil, em 2023, era o quarto maior produtor mundial de leite (FAO, 2023). No entanto, na produção leiteira, assim como em qualquer setor produtivo, deve-se buscar a redução de impactos ao meio ambiente, para que se torne mais sustentável e competitiva em mercados globais. Paralelo ao cenário ambiental, tem-se a necessidade de aumento no volume de produção e de aproveitamento de alimentos, uma vez que as projeções indicam que a população alcançará os 10 bilhões de pessoas em 2050 (UNDESA, 2019). Desta forma, um dos grandes desafios para a agropecuária é aumentar a produção e torná-la cada vez mais sustentável.

Considerando questões de sustentabilidade, estima-se que em 2020, o setor agropecuario brasileiro foi responsável por 28,5% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no país, sendo a fermentação entérica a principal fonte de emissão na agropecuária (MCTI, 2022a). Considerando as fontes de sumidouro presentes nas produções agropecuárias, ações que buscam reduzir as emissões devem ser tomadas. Além disso, deve-se considerar que as emissões de gases de GEE impactam diretamente nos sistemas agropecuarios mundiais, uma vez que são diretamente dependentes do clima e do meio ambiente (Onhinam, 2022). Eventos extremos, como secas, chuvas intensas e altas temperaturas, além da elevação da concentração de CO₂ e das temperaturas do ar e do solo, impactam na produção de alimentos e prejudicam a segurança alimentar, um tópico que, frente as projeções populacionais, é bastante sensível (UNDESA, 2019; Bouteska *et al.*, 2024). Dentre os impactos na produção de alimentos, ocorre a redução das áreas cultiváveis e alteração ou diminuição na época de semeadura (Pandolfo *et al.*, 2014; Evangelista *et al.*, 2022); maior incidência de locais sob condição de estresse hídrico (IPCC, 2023); conversão de florestas tropicais em savanas e áreas de vegetação semiárida em regiões de formação vegetal árida (MMA, 2016); diminuição da produtividade (Cuadra *et al.*, 2018; Assad *et al.*, 2019b; Carvalho *et al.*, 2020; Cintra; Melo e Menezes, 2020; Cunha & Braga, 2022; Távora; França; Lima, 2022) e perda de biodiversidade (Távora; França; Lima, 2022; Assad *et al.*, 2019b).

Há ainda os impactos financeiros (Assad *et al.*, 2019b) à nível nacional, com perdas no Produto Interno Bruto (PIB) na casa dos bilhões de reais anuais (Tanure, 2020); intensificação dos processos erosivos e redução na fertilidade dos solos (Carter & Gulati, 2014; Assad *et al.*, 2019b); declínio da população de agentes polinizadores (Assad *et al.*, 2019b; Távora; França; Lima, 2022); diminuição da fertilidade dos animais e plantas (Assad *et al.*, 2019b); bem como alterações na manifestação e no impacto de pragas e doenças nas plantas (Aquad *et al.*, 2017; Raza & Bebbber, 2022; Singh *et al.*, 2023; Lahlali *et al.*, 2024). Ainda, há de se pensar na Agenda 2030, proposta pela ONU em 2015 (UN, 2015), que reúne 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) visando a erradicação da fome, proteção dos direitos humanos e preservação do planeta até 2030 (ONU, 2015).

Diante deste cenário, a fim de calcular as emissões de GEE na agropecuária, para melhor compreensão dos principais pontos de emissão e das práticas mitigadoras a serem adotadas, algumas metodologias de mensuração direta ou a partir de estimativa foram desenvolvidas. Os métodos diretos promovem a mensuração das emissões com base em dados coletados em campo, enquanto os métodos indiretos promovem estimativas por meio cálculos pautados em dados já existentes (Costa *et al.*, 2006).

A escolha do método é pautado nos objetivos do estudo e dos recursos disponíveis para executá-lo. Para este trabalho utilizou-se uma calculadora de emissão, *Cool Farm Tool* (CFT), que realiza a estimativa de emissão de GEE em propriedades rurais. A CFT é uma ferramenta *online*, com acesso gratuito restrito a 5 avaliações por conta cadastrada. Esta ferramenta foi escolhida em função de sua (ainda que limitada) gratuidade, fácil acesso, manipulação e entendimento, pelo dados que são armazenados *online* (CFT, 2024).

Com isto, o objetivo definido neste estudo foi estimar as emissões de gases de efeito estufa e relacioná-las com as características de produção de fazendas leiteiras nos estados do Paraná e São Paulo. Como objetivos específicos, buscou-se identificar características associadas a menores emissões e fornecer subsídios para práticas mais sustentáveis. As seguintes hipóteses foram definidas para essa pesquisa: H1 - fazendas que apresentam maior volume de produção de leite, emitem menor quantidade de GEE por litro de leite corrigido para gordura e proteína (kg CO₂e/kg FPCM), e H2 - o padrão genético dos animais impacta nas emissões de GEE (kg CO₂e/kg FPCM).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Cool Farm Tool e Outras Ferramentas Para Avaliação de GEE

A plataforma utilizada para o cálculo das emissões foi a *Cool Farm Tool* (CFT), criada pela empresa Unilever® em parceria com a Universidade de Aberdeen, localizada na Escócia. A plataforma está inserida na *Cool Farm Alliance*, uma empresa sem fins lucrativos, cuja missão é fornecer meios para intensificar a transição da agricultura convencional para uma pautada em sustentabilidade, através de ferramentas e recursos de mensuração confiáveis e com respaldo científico (CFT, 2025).

Ainda que a ferramenta escolhida para realização deste estudo tenha sido a CFT, outras estão disponíveis para estudos sobre a emissão de gases de efeito estufa. Entre essas, o *Greenhouse Gas Protocol* (GHG) é uma metodologia que visa fornecer ensinamentos, padrões de mensuração e ferramentas para a estimativa das emissões dos GEE; as quais são realizadas por meio de planilhas de Excel disponibilizadas pelos organizadores – *World Resources Institute* (WRI) e *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) (GHG Protocol, 2004; Caro, 2019). Em 2008, foi lançado o Programa Brasileiro GHG Protocol, que visa adaptar o protocolo original às condições e a realidade brasileira (FGV, 2025).

Há também o programa EX-ACT, desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (do inglês “*Food and Agriculture Organization*”, FAO) que também utiliza a planilha do Excel para realização dos cálculos, igual o programa CCAFS-MOT, desenvolvido pela Universidade de Aberdeen (MacSween & Feliciano, 2018).

O programa SHAMBA analisa os dados por meio de sistema *Python*, e foi concebido pela Universidade de Edimburgo (MacSween & Feliciano, 2018). A plataforma ALU, elaborada pela Universidade Estadual do Colorado, utiliza website próprio para os cálculos, mas requer submissão e avaliação de formulário para que seja concedida credencial de acesso ao *download* do programa (NREL, 2024). Com exceção de CCAFS-MOT, EX-ACT e SHAMBA, os demais programas necessitam de cadastro; e apenas CCAFS-MOT e SHAMBA possuem maior facilidade de manipulação, enquanto os demais programas necessitam de maior conhecimento para serem utilizados (MacSween & Feliciano, 2018).

Com base nas características de cada programa e no proposto para o desenvolvimento deste trabalho, a ferramenta CFT foi a considerada mais propícia pois,

ainda que tenha um número limitado de avaliações gratuitas, é de fácil acesso e manipulação; todos os dados são inseridos e armazenados *online*; é uma ferramenta simples de utilizar, fazendo com que a experiência não seja necessária (Alexandropoulos *et al.*, 2023; CFT, 2024). A CFT utiliza a metodologia de estimativa de emissões de GEE elaborado pelo IPCC em 2006 (Alexandropoulos *et al.*, 2023).

A ferramenta *Cool Farm Tool* possibilita aos produtores ou interessados, a visualização do impacto da gestão no desempenho ambiental da propriedade, viabilizando o acompanhamento e medição das práticas adotadas nas propriedades rurais ao longo do tempo. Há também três frentes possíveis de serem trabalhadas na ferramenta: gases de efeito estufa (GEE), Água e Biodiversidade. Para os GEE, a CFT realiza a mensuração das emissões nas propriedades, além do sequestro de carbono (C) no solo. Para a Água, a ferramenta disponibiliza as pegadas hídricas azuis e verdes, bem como os requisitos de irrigação das culturas.

A pegada hídrica azul diz respeito ao uso consuntivo de água doce superficial ou subterrânea. O uso consuntivo concerne à: 1) evaporação de água, 2) incorporação de água a um produto, 3) saída da água da bacia hidrográfica, escoando para outra bacia ou o oceano, e 4) ausência de retorno da água no mesmo período em que foi retirada (saída em período de seca e retorno em período de chuvas). Por sua vez, a água verde corresponde à quantidade de água utilizada durante o processo produtivo, ou seja, a água que é precipitada no continente e é retida permanentemente no solo ou temporariamente na superfície do mesmo ou na vegetação (Hoekstra *et al.*, 2011).

Por fim, na categoria Biodiversidade, há a determinação do suporte da gestão agrícola na biodiversidade. Nela, os utilizadores da ferramenta conseguem dimensionar o impacto positivo que estão impondo, e quanto mais ações positivas existirem no sistema, maior é a pontuação desse.

Neste trabalho o foco foi dado exclusivamente na emissão de GEE, e são necessárias informações tais como a área de cultivo; quantidade e tipo dos fertilizantes utilizados; rendimento da colheita; consumo de energia (elétrica e uso de combustíveis); dados sobre o rebanho, manejo de dejetos e alimentação dos animais.

Na ferramenta há oito divisões para inserção dos dados: Geral, Leite, Rebanho, Pastagem, Alimentação, Dejetos, Energia e Processamento, e Transporte (do inglês “*General*”, “*Milk*”, “*Herd*”, “*Grazing*”, “*Feed*”, “*Manure*”, “*Energy and Processing*”, “*Transport*”, respectivamente). Na primeira aba, caso a pastagem utilizada seja cultivada na própria fazenda, é solicitada a inserção de dados como o tipo de cultura, a

área e o ano de colheita, a quantidade de material colhido e quantidade de produto comercializável. Há ainda a necessidade de adicionar a quantidade de resíduos resultantes da colheita, de que forma estes são tratados e, caso haja coprodutos, inserir o tipo e a percentagem da colheita ao qual corresponde.

Main breed: Girolando

Start of reference year: start February 2025

End of reference year: start February 2026

Assessment name: girolando_2025

Total milk production: 555,555 kilograms

Fat content: 4 %

True protein content: 3.5 %

Fig. 1. Layout da aba Leite na ferramenta *Cool Farm Tool* (CFT, 2025).

Ao longo de cada tópico há um quadro com as emissões de GEE, que pode fornecer as emissões totais ou por unidade, de acordo com a escolha do usuário. Na divisão Leite (Fig. 1), é necessário obter dados sobre a raça utilizada, início e fim do ano a ser mensurado, produção total de leite, bem como o teor lipídico e de proteína bruta, sendo também possível nomear a avaliação e anexar notas de usuário.

Live weight unit: kilograms

Category	On-farm animals		Sold animals		Purchased animals	
	Number	Live weight	Number	Live weight	Number	Live weight
Milk cows lactating dairy cows	5	416	0	416	0	416
Dairy calves 0-1 year for replacement of dairy cows	0	124	0	124	0	124
Meat calves 0-1 year for beef production	0	173	0	173	0	173
Heifers 1 year until first calving	0	301	0	301	0	301
Dry cows non-lactating dairy cows	0	450	0	450	0	450
Nursing / suckling cows	0	416	0	416	0	416

Fig. 2. Layout da aba Rebanho na ferramenta *Cool Farm Tool* (CFT, 2025).

Em Rebanho (Fig. 2) é preciso inserir a quantidade e peso vivo dos animais efetivamente na fazenda, dos animais vendidos e dos comprados, de acordo com as categorias bezerros leiteiros, bezerros de corte, novilhas, vacas leiteiras, vacas secas, enfermagem/amamentação de vacas.

Para Pastagem (Fig. 3), deve-se adicionar o número de dias, horas por dia, tipo de pastagem e qualidade para cada categoria; além de incluir a fertilização das pastagens com qual área e o tamanho desta que foi fertilizada.

Category **Days** **Hours / day** **Grazing type** **Grazing quality**

Milk cows
lactating dairy cows

5 5 Confined pastur High

Grassland fertilisation

Edit Complete this section for the grazing area used by your dairy herd only.

Enter data on fertiliser application rate per unit of area. Note that you can enter inputs by 'fertiliser weight' OR by 'units' of the active ingredient, such as units of N (nitrogen).

If your fertiliser type is not listed, you can compose your own, selecting your own values for active ingredients.

Grassland area 0 hectares

Fig. 3. Layout da aba Pastagem na ferramenta *Cool Farm Tool* (CFT, 2025).

No tópico Alimentação o usuário tem a opção de inserir os dados em consumo de matéria seca (CMS), como visto na Figura 4.

Milk cows

Herd average DMI/day: 0.00 kg
Milk cows average DMI/day: 0.00 kg

Feed component (select component) System boundary: X Remove

Region -----

DM / animal / day -----

Fig. 4. Layout da aba Alimentação na ferramenta *Cool Farm Tool*, para CMS conhecida (CFT, 2025).

Porém, caso não tenha esse conhecimento, a ferramenta possibilita um método alternativo, no qual os itens são inseridos e o programa estima o CMS (Fig. 5).

Fig. 5. Layout da aba Alimentação na ferramenta *Cool Farm Tool*, para alimentação média do rebanho (CFT, 2025).

Sabendo o CMS, a ferramenta solicita que sejam preenchidas as informações de cada categoria de animais, inserindo o componente de alimentação (a ferramenta apresenta diversos alimentos a serem escolhidos), a região (podendo optar por um país ou selecionar a alternativa global), e o CMS por animal por dia. Ainda é possível incluir os aditivos utilizados na alimentação que visam a redução da fermentação entérica, adicionando a categoria animal, o tipo de aditivo e a dose por quilo de matéria seca (MS), fibra detergente neutro (FDN) e extrato etéreo, bem como o número de dias, o aditivo que foi utilizado, e a porcentagem da categoria animal que recebeu. Caso o usuário não conheça o CMS, deve apenas inserir o tipo de alimento, a região e a porcentagem de utilização do alimento e o sistema irá calcular o consumo.

Fig. 6. Layout da aba Dejetos na ferramenta *Cool Farm Tool* (CFT, 2025).

Em Dejetos deve-se acrescentar a categoria animal, o tipo de manejo de dejetos (como lagoa anaeróbica ou compostagem) e a porcentagem. Além disso, há um subtópico que se destina às camas, no qual se insere o tipo de cama e a quantidade (Fig. 6).

Fig. 7. Layout da aba Energia e Processamento na ferramenta *Cool Farm Tool* (CFT, 2025).

Para Energia e Processamento adiciona-se informações sobre a fonte de energia (diesel, elétrica, gasolina, entre outros), a quantidade utilizada, e é possível rotular a energia utilizada (Fig. 7).

Em Transporte (Fig. 8) considera-se o peso das mercadorias e a distância que são transportadas, devendo incluir o tipo de transporte (carro, navio, aéreo, entre outros), o peso, a distância, e caso o usuário queira, também é possível rotular.

Fig. 8. Layout da aba Transporte na ferramenta *Cool Farm Tool* (CFT, 2025).

Ao término da inserção dos dados, a ferramenta fornece as emissões totais e as emissões por quilo de leite produzido e corrigido para gordura e proteína (do inglês “*Fat and Protein Corrected Milk*”, FPCM). A ferramenta ainda apresenta um gráfico com as emissões totais distribuídas em setores, bem como os dados detalhados para cada tópico com as emissões dos principais gases, o total de CO₂e e a emissão por kg FPCM. Há também como visualizar, em gráficos, a contribuição de cada categoria nas emissões de esterco; entéricas; de pastagens; de ração; de energia, combustível e emissões de água; de transporte e de coprodutos.

2.2 Seleção das Propriedades

O levantamento de dados e informações foi realizado em 19 propriedades leiteiras localizadas nos estados do Paraná e São Paulo, sendo estes estados escolhidos em função de contatos prévios da equipe e da disponibilidade dos produtores em participar da pesquisa. A renda obtida em todas as propriedades advém, majoritariamente, da produção leiteira.

Dessa forma, optou-se pela amostragem por conveniência, que se caracteriza pela seleção dos participantes ser efetuada na proximidade destes com os pesquisadores, garantindo maior facilidade de acesso e maior garantia de participação (Rahi, 2017). Foi necessário a familiaridade dos pesquisadores com os produtores para que concordassem em participar e fornecer dados de produção, este tipo de amostragem demonstrou ser o mais adequado. Este tipo de amostragem foi também adotado nas pesquisas de Delfino *et al.* (2020), Prajapati *et al.* (2022), Doidge *et al.* (2024), Edwards *et al.* (2024), Herrera *et al.* (2024) e Kramer & Bovernkerk (2024).

Os dados foram coletados de forma presencial e por meio do aplicativo de mensagens instantâneas *Whatsapp* de janeiro de 2024 a março de 2025. Os dados coletados foram inseridos e processados na ferramenta *Cool Farm Tool*. A fim de manter a privacidade dos produtores, suas propriedades e informações foram codificadas (P1, P2,...P19).

2.3 Inserção de Dados, Análises e Comparações Entre as Propriedades

Nesta pesquisa considerou-se, como período de referência para os dados inseridos na ferramenta CFT, os meses de janeiro de 2024 a março de 2025. Para o preenchimento das abas e informações apresentados na CFT, somente uma delas não foi preenchida devido a inconsistência de informações obtidas durante a coleta de dados, sendo aquela que se refere aos veículos pesados, a exemplo de caminhões.

Após a inserção dos dados na plataforma, estes foram analisados pelos pesquisadores e comparados com literatura para verificação do impacto ambiental gerado pelas propriedades amostradas. Inicialmente foram feitas análises descritivas para caracterizar as propriedades e os sistemas de produção. Em uma segunda etapa, as informações geradas no CFT foram discutidas a partir de indicadores que impactam nas emissões de GEE nas propriedades leiteiras, sendo pastejo; adubação de pastagem;

alimentação; fermentação entérica; manejo de dejetos; energia e processamento e transporte.

Por fim, a partir destes indicadores e dos resultados de produção de leite e de emissões totais e de leite corrigido, as propriedades foram comparadas entre si, para que fosse possível aferir quais propriedades apresentaram níveis mais elevados e mais reduzidos de emissões em comparação com as demais; além de identificar quais indicadores apresentavam maior contribuição nas emissões e, quais os gases com maior volume de emissão. Após observação destes dados, foi possível comparar com as características de cada propriedade e discutir sobre os resultados.

Alguns dos resultados foram obtidos por meio da comparação entre duas ou mais propriedades e, para isso, analisou-se variáveis como o número de animais do rebanho, as emissões (totais e por FPCM), raça e a produção de leite. As combinações foram identificadas por similaridade entre uma ou mais variáveis e discrepância em outras. A exemplo, as propriedades “A” e “B” hipotéticas. Propriedades “A” e “B” apresentam tamanho de rebanho e produção de leite semelhantes, entretanto, as emissões totais de GEE são bastante distintas. Desta forma, buscou-se, por meio da análise destas propriedades e de suas características, encontrar os prováveis fatores que desencadearam a diferença de emissões de GEE, entre outras possíveis causas.

A partir disso foi também possível sugerir práticas e mudanças que alterem a realidade das emissões de GEE, tornando os sistemas menos poluentes e consequentemente beneficiando o ambiente, além da própria produção - uma vez que alimentos produzidos com sustentabilidade estão sendo cada vez mais buscados pelos consumidores.

A análise das emissões de GEE foi feita predominantemente a partir do volume de leite corrigido pela gordura e proteína (kg CO₂e/kg FPCM). Essa escolha deve-se ao fato que essa expressão das emissões é ajustada com base na composição do leite produzido, não somente levando em consideração a emissão total (Chamilete, 2024). Esse aspecto apresenta relevância significativa quando se considera que fatores como raça (Silvestre *et al.*, 2021; Olijhoek *et al.*, 2022; Salzano *et al.*, 2022), categoria animal (Cerdótes *et al.*, 2004; Bajodek *et al.*, 2024), idade dos animais (Cerdótes *et al.*, 2004; Bajodek *et al.*, 2024), individualidade de animal (Garnsworthy, *et al.*, 2012; HosseinZadeh, 2022) e alimentação diferentes (Boland *et al.*, 2020; Olijhoek *et al.*, 2022; Salzano *et al.*, 2022) desencadeiam metabolismos (Benedet *et al.*, 2020; Soares *et al.*, 2021), composição de leite (Cerdótes *et al.*, 2004; Boland *et al.*, 2020; Salzano *et*

al., 2022) e emissões distintas (Garnsworthy, *et al.*, 2012; Boland *et al.*, 2020; Silvestre *et al.*, 2021; HosseinZadeh, 2022; Olijhoek *et al.*, 2022; Kamalanathan *et al.*, 2023).

Ainda que métricas como o FPCM permitam maior padronização e uma comparação mais equitativa dos resultados (Vellinga; Gerber; Opio, 2010), utilizar um único índice nas avaliações pode limitar as interpretações (Salou; Le Mouél; van der Werf, 2017). Outros indicadores, como as Emissões Totais, também podem fornecer resultados cruciais para a análise dos impactos dos sistemas produtivos. Sendo assim, ambos os parâmetros – volume total de leite e FPCM foram levados em consideração para a execução deste trabalho e a interpretação de resultados.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterização Geral das Propriedades e Emissões

Como caracterização das propriedades, aproximadamente 90% estão localizadas no estado do Paraná. A raça Holandesa é utilizada em 84,2% das produções analisadas, com 10,5% sendo da raça Jersey, e uma única propriedade com rebanho da raça Girolando. O sistema de ordenha adotado em todas as propriedades é ordenha mecânica.

Quanto ao manejo de dejetos, entre as 19 propriedades avaliadas, 15 realizam Distribuição Diária. Em segundo lugar a Lagoa Anaeróbica Descoberta, citada como técnica utilizada em 11 propriedades. As demais utilizam Curral Seco, Armazenamento Sólido, Compostagem em leiras e Biodigestores Anaeróbicos. Apenas 3 propriedades (a cerca de 15,7%) utilizam apenas um método de manejo de dejetos, a Distribuição Diária (Anexo Único).

Os teores de gordura do leite oscilaram entre 3,40 e 5,00%, com média de 3,89%. Já os teores de proteína variaram entre 3,20 e 4,20%, apresentando em média 3,58% de proteína. Em relação ao tamanho de rebanho, a média foi estabelecida em 105,26 animais (desvio padrão de ± 754.223 animais), com o maior rebanho sendo de 3.298 cabeças e, o menor, 27. Dentre as propriedades estudadas, apenas 4 não possuem uma categoria animal em pastejo por algum período, e pouco mais de 26% não realizam algum tipo de fertilização.

Em se tratando da produção de leite, observa-se volume médio de 3.470.803,26 kg/ano de leite (desvio padrão de $\pm 7.900.00$ kg), com P7 correspondendo a mais de 52% do volume total de leite produzido, entre todas as propriedades analisadas. Em relação ao volume de leite produzido, P7 apresentou o maior valor de produção, que se

destaca com diferença de mais de 22,9 toneladas para a segunda propriedade de maior volume de leite. As propriedades que obtiveram os menores volumes de leite produzido foram P15 e P11 (Fig. 9).

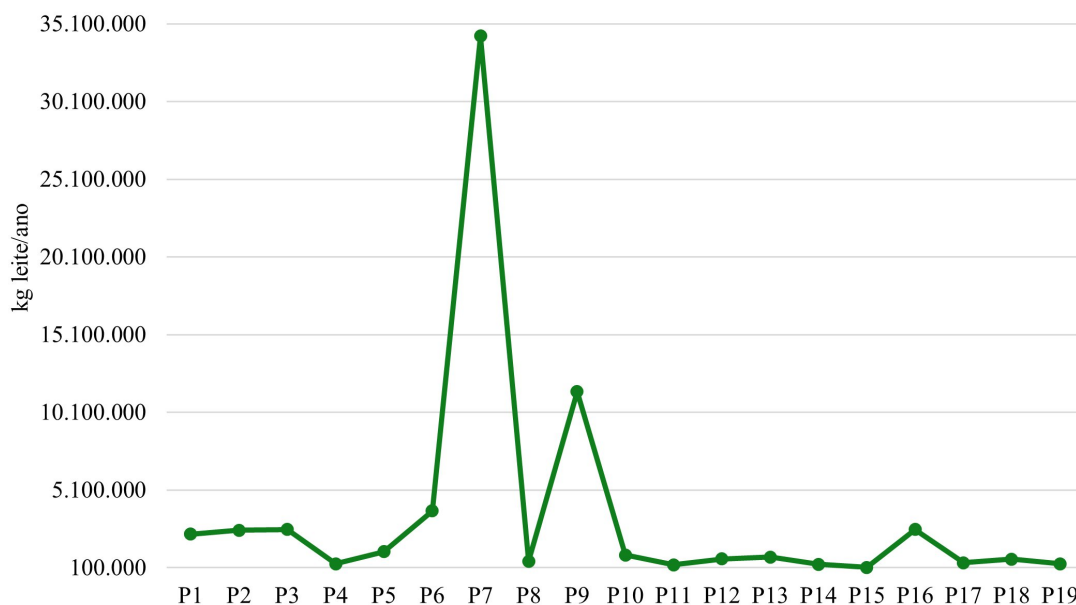


Fig. 9. Volume de produção de leite nas propriedades analisadas.

Os dados sobre as emissões totais (kg CO₂e) e FPCM (kg CO₂e/kg FPCM), obtidos através da análise feita pela ferramenta “Cool Farm Tool”, estão dispostos na Tabela 1. A propriedade com o maior valor de emissões totais foi P7, com valor superior a 36 milhões de kg CO₂e; seguida por P9 e P2, com cerca de 12 e 9 milhões de kg CO₂e, respectivamente. Quanto às propriedades com as menores Emissões Totais, estas são lideradas por P15 (210.410 kg CO₂e), P4 (403.640 kg CO₂e) e por P11 (608.790 kg CO₂e) (Tabela 1).

Para as emissões em FPCM, P2 registrou o maior valor (3,19 kg CO₂e/kg FPCM). Na sequência tem-se, respectivamente, P16 (2,74 kg CO₂e/kg FPCM) e P17 (2,17 kg CO₂e/kg FPCM) (Tabela 3).

Em relação às propriedades com menores emissões em FPCM, observa-se respectivamente, P9 (1,11 kg CO₂e/kg FPCM), P7 (1,13 kg CO₂e/kg FPCM) e P4 (1,14 kg CO₂e/kg FPCM). Nota-se que, ainda que tenha liderado as emissões no indicador de emissões totais, para FPCM a propriedade P7 apresenta-se como a segunda menor emissora (Tabela 1).

Tabela 1Emissões totais (kg CO₂e) e corrigidas (kg CO₂e/kg FPCM).

Propriedade	Emissões totais (kg CO ₂ e)	Emissões em FPCM (kg CO ₂ e/kg FPCM)
P1	4.986.808,79	2,21
P2	9.749.880	3,19
P3	4.541.140	1,76
P4	403.640	1,14
P5	1.737.895,3	1,56
P6	5.796.240	1,57
P7	36.758.480	1,13
P8	1.165.568,03	2,15
P9	12.319.380	1,11
P10	1.961.440	2,19
P11	608.790	2,26
P12	1.301.770	2,03
P13	1.481.250	1,78
P14	614.260	1,84
P15	210.410	1,65
P16	5.862.532,86	2,27
P17	1.150.200	2,74
P18	1.495.540	2,17
P19	720.293,47	2

Entre as propriedades analisadas, P7 e P9 distinguem-se em mais de 24 ton CO₂e em emissões totais e, ainda assim, quando analisados seus valores a partir da produção de leite corrigida, a diferença nas emissões é de apenas 0,02 kg CO₂e/kg FPCM. O mesmo acontece ao comparar P7 com as demais propriedades (Tabela 1).

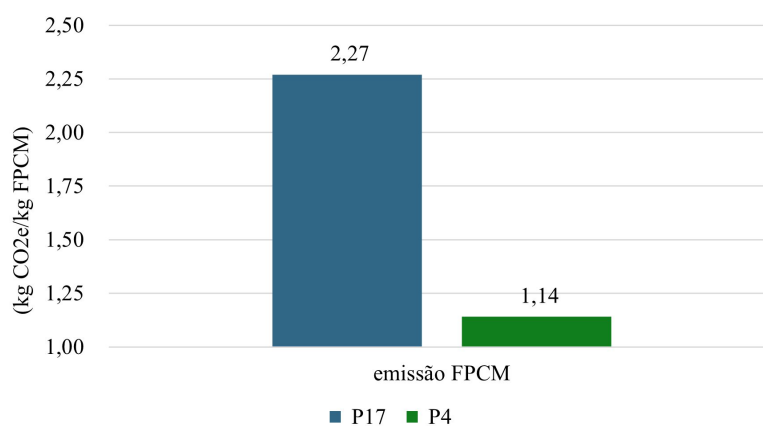


Fig. 10 Emissão total, em kg CO₂e (*100.000) e em FPCM (kg CO₂e/kg FPCM) de P17 e P4. Valores de Emissão Total devem ser multiplicados por 100.000 para obter o valor real. Emissão total em kg CO₂e e FPCM (kg CO₂e/kg FPCM).

No *ranking*, a 3ª propriedade menos emissora em FPCM é P4 em emissões totais, emite 36 ton CO₂e. P5 e P10 apresentam valores de emissões totais aproximadas (cerca de 223 mil kg CO₂e as diferem – 12,86%), e as emissões em FPCM são 40% maiores em P10 (Tabela 1). Este resultado também é observado quando se compara as propriedades P17 e P4. A P17 apresenta emissão de 1,13 kg CO₂e/kg FPCM superior à P4, visto que os rebanhos são da mesma raça, diferindo em 4 animais. Apesar disso, tanto emissão total quanto a emissão em FPCM são consideravelmente elevada em P17, com diferença acima de 760 ton CO₂e em relação a P4 (Fig. 10).

É interessante ainda destacar, que as emissões de P4 e P17 podem apresentar grande diferença (seja para emissões totais ou para emissões em leite corrigido), em função do perfil de GEEs. Maiores valores de um determinado GEE afetam o resultado das emissões em CO₂e, uma vez que cada gás apresenta seu Potencial de Aquecimento Global (do inglês “*Global Warming Potential*”, GWP) específico (Wilkes *et al.*, 2020; Mazzetto *et al.*, 2022). Os valores das emissões totais e em FPCM para P4 e P17 foram calculados em função do GWP dos gases, exemplificando o impacto de cada um no cálculo de CO₂e (Tabela 2).

Tabela 2

Valores de emissões de GEE acumuladas, em quilogramas, para P4 e P17.

	P4	P4 (kg CO ₂ e)	P17	P17 (kg CO ₂ e)
CO ₂	266.472,06	266.472,06	560.900	560.900
N ₂ O	69,69	19.025,37	173,83	47.455,59
CH ₄	4.232,02	118.496,56	19.425,43	543.912,04
Total		403.993,99		1.152.267,63

Apresentando exatamente o mesmo número de animais em rebanho, P5 emite 1.737 ton CO₂e e apresenta a emissão para leite corrigido de 1,56 (kg CO₂e/kg FPCM), enquanto P12 emite 1.301 ton CO₂e e exibe emissão, em leite corrigido, de 2,03 (kg CO₂e/kg FPCM) (Fig. 11). O volume de produção de leite de P13 é de, aproximadamente, 135 ton de leite a mais que P18, com diferença de 3 animais no rebanho. E, enquanto a emissão total de P18 supera P13 em 14 ton CO₂e; em emissões de leite corrigido, P13 exibe o menor valor, cuja produção é mais expressiva (Fig. 11).

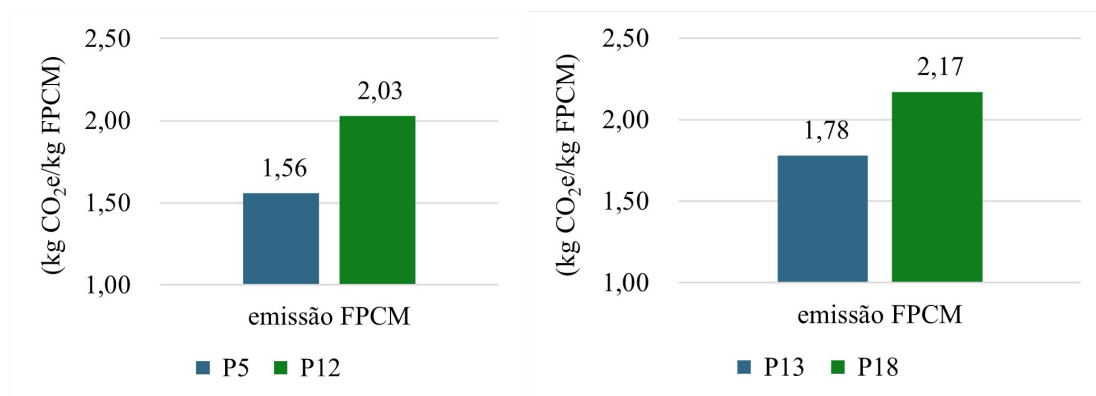


Fig. 11. Comparações das emissões em FPCM de P5 e P12 e P13 e P18.

Ainda, P2 apresentou o maior valor de emissão para FPCM, mesmo estando entre as produções de leite mais expressivas. Além das características produtivas como dieta, tamanho do rebanho, manejo de dejetos e fertilização de pastagens que interferem neste resultado, um detalhe importante é que a raça utilizada é Jersey (tal como P14), a qual tem por atributo animais que apresentam elevado teor de gordura no leite quando comparados a raças como a Holandesa (Eijndhoven *et al.*, 2013; Sanjayaranj *et al.*, 2023), valor que para P2 é 5% (Fig. 12).

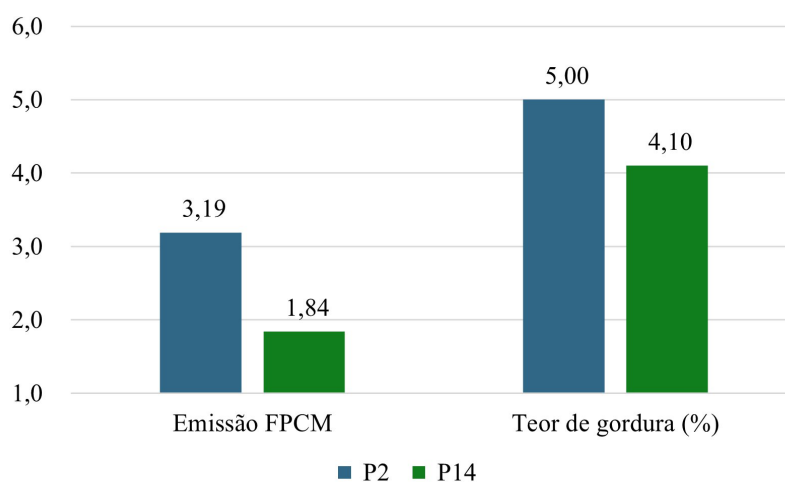


Fig. 12. Emissão em FPCM (kg CO₂e /kg FPCM) e teor de gordura (%) de P2 e P14.

Entretanto, é importante avaliar as demais características da produção e o volume de leite produzido, já que fazendas com produções de leite semelhantes, como P1, P2, P3 e P16, apresentaram emissões totais e em FPCM distintas (Fig. 13). Embora os teores de proteína e gordura entre P3 e P10 oscilem apenas 0,2%, a produção de P10 é quase 3 vezes menor que de P3 e, nesse caso, a FPCM de P10 é consideravelmente superior a P3 (Fig. 14).

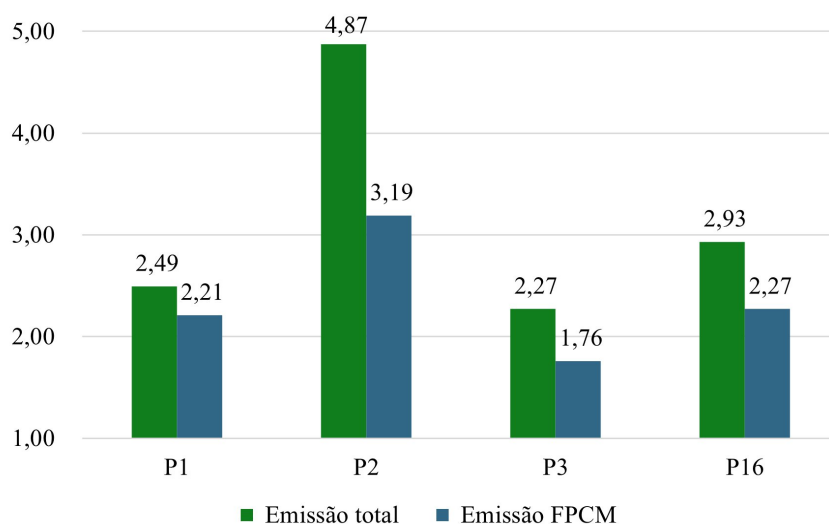


Fig. 13. Emissão total, em kg CO₂e (*2.000.000) e em FPCM (kg CO₂e/kg FPCM) para P1, P2, P3 e P16. Valores de Emissão Total devem ser multiplicados por 2.000.000 para obter o valor real.

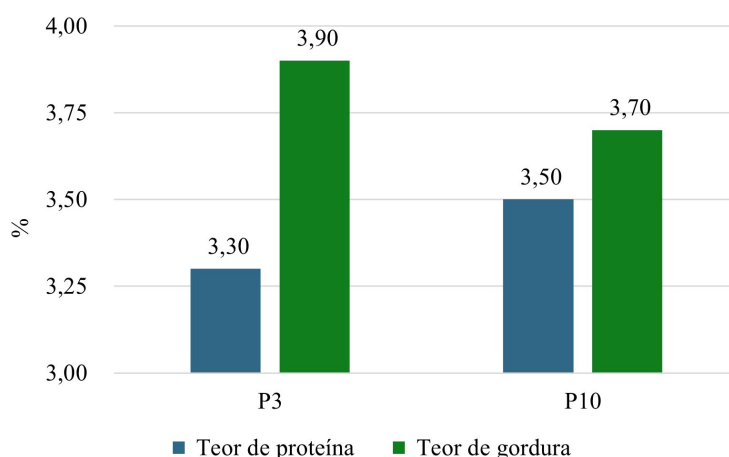


Fig. 14. Teores (%) de proteína e gordura dos leites produzidos por P3 e P10.

3.2 Análise por Indicadores

3.2.1 Pastejo

Para o indicador Pastejo, tanto a Emissão Total quanto a emissão de N₂O apresentaram o maior valor em P3. Para as emissões em CO₂ e CH₄ todas as propriedades apresentaram valores nulos no indicador. Quanto à emissão em FPCM (kg CO₂e/kg FPCM), a propriedade com maior valor foi P15, que se destaca com diferença de 15% para a propriedade que a segue (Tabela 3). Em razão de P8, P9, P13 e P17 não possuírem nenhuma categoria animal em pastejo, seus valores foram zero para emissão total (kg CO₂e), em FPCM (kg CO₂e/kg FPCM) e emissão de N₂O (kg). Ainda que as emissões totais (kg CO₂e) tenham apresentado os maiores valores em P3, P7, P15 e P2, as emissões em FPCM foram lideradas apenas por P15, com P7 exibindo valor nulo, e P2 e P3 apresentando FPCM de 0,01 (kg CO₂e/kg FPCM).

Tabela 3

Emissões totais, em N₂O e para leite produzido e corrigido para gordura e proteína para o indicador Pastejo.

Propriedade	Emissão total (kg CO ₂ e)	Emissão de N ₂ O (kg)	Emissão para FPCM (kg CO ₂ e/kg FPCM)
P1	368,79	1,35	0
P2	21.780	79,76	0,01
P3	31.210	114,33	0,01
P4	1.200	4,38	0
P5	55,30	0,20	0
P6	7.170	26,28	0
P7	26.840	98,30	0
P8	0	0	0
P9	0	0	0
P10	12.570	46,05	0,01
P11	2.040	7,47	0,01
P12	4.020	14,74	0,01
P13	0	0	0
P14	8.730	31,99	0,03
P15	23.860	87,40	0,19
P16	612,86	2,24	0
P17	0	0	0
P18	7.890	28,90	0,01
P19	14.070	51,56	0,04

3.2.2 Adubação de Pastagem

Em relação à Adubação de Pastagem, P7 apresentou os valores mais expressivos para Emissão Total, emissão de CO₂ e de N₂O em Kg. Já para a emissão em FPCM, P15 obteve destaque ao apresentar um número 38% superior a segunda propriedade de maior FPCM. Também é possível notar que, entre propriedades que realizam adubação, P7 apresentou a segunda menor emissão por FPCM. A emissão de CH₄ para este indicador foi zero para todas as unidades de produção (Tabela 4).

Tabela 4

Emissões totais, em CO₂ e N₂O, e para leite produzido e corrigido para gordura e proteína para o indicador Adubação de Pastagem.

Propriedade	Emissão total (kg CO ₂ e)	Emissão de CO ₂ (kg)	Emissão de N ₂ O (kg)	Emissão para FPCM (kg CO ₂ e/kg FPCM)
P1	273.030	98.970	637,61	0,12
P2	919.010	182.300	2.700	0,3
P3	398.240	79.000	1.170	0,15
P4	0	0	0	0
P5	0	0	0	0
P6	592.010	334.480	943,33	0,16
P7	1.270.000	669.400	2.190	0,04
P8	0	0	0	0
P9	0	0	0	0
P10	124.720	70.460	198,73	0,14
P11	37.800	20.620	62,95	0,14
P12	40.860	21.630	70,44	0,06
P13	1.400	0	5,14	0
P14	102.110	36.800	239,24	0,30
P15	69.020	17.820	187,53	0,54
P16	81.950	31.010	186,6	0,03
P17	30.840	15.860	54,89	0,07
P18	47.590	19.850	101,62	0,07
P19	0	0	0	0

3.2.3 Alimentação

Também em Alimentação a propriedade P7 apresenta os maiores valores para Emissão Total, de CO₂, de N₂O e CH₄ em Kg. Entretanto, novamente, quanto à FPCM as maiores emissões pertencem a outra propriedade, P12 (Tabela 5).

Tabela 5

Emissões totais, em CO₂, N₂O, CH₄ e para leite produzido e corrigido para gordura e proteína para o indicador Alimentação.

Propriedade	Emissão total (kg CO ₂ e)	Emissão de CO ₂ (kg)	Emissão de N ₂ O (kg)	Emissão de CH ₄ (kg)	Emissão para FPCM (kg CO ₂ e/kg FPCM)
P1	2.370.000	2.240.000	422,96	410,13	1,05
P2	3.500.000	3.310.000	654,02	630,14	1,14
P3	2.350.000	2.220.000	441,02	422,63	0,91
P4	255.320	239.220	53,64	52,02	0,73
P5	1.040.000	973.100	240,69	201,31	0,94
P6	2.000.000	1.730.000	878,58	787,50	0,54
P7	23.200.000	20.410.000	9.710	5.090	0,72
P8	743.720	710.380	111,10	107,73	1,37
P9	7.230.000	6.150.000	3.620	3.130	0,65
P10	870.880	726.890	485,17	413,52	0,97
P11	386.010	363.070	76,47	74,15	1,43
P12	927.540	871.930	185,36	179,74	1,45
P13	912.720	857.170	184,13	189,33	1,09
P14	260.160	231.920	94,69	85,39	0,78
P15	2.100	1.930	0,55	0,59	0,02
P16	2.850.000	2.710.000	450,66	436,99	1,1
P17	491.230	470.980	67,48	65,43	1,17
P18	654.320	612.130	101,62	145,65	0,95
P19	457.670	432.640	0	80,88	1,27

3.2.4 Fermentação entérica

Quanto às Emissões Totais e emissão de CH₄ da Fermentação Entérica, novamente P7 lidera a classificação de emissões e, mais uma vez, é necessário destacar que o rebanho é consideravelmente maior que as demais propriedades. Porém em relação ao FPCM, P10 quem liderou as emissões, com valor 64% maior que a segunda maior emissora do indicador. Por outro lado, a propriedade P4, que não apresenta o menor rebanho das propriedades analisadas - apresentou os menores valores para Emissão Total, emissão de CH₄ e emissão para FPCM. Para os gases CO₂ e N₂O os valores encontrados foram iguais a zero. Ainda que possua a maior emissão total e a maior emissão de CH₄, P7 apresenta o 3º menor valor de emissão entérica em FPCM (Tabela 6).

Tabela 6

Emissões totais, CH₄ e para leite produzido e corrigido para gordura e proteína para o indicador Fermentação Entérica.

Propriedade	Emissão total (kg CO ₂ e)	Emissão de CH ₄ (kg)	Emissão para FPCM (kg CO ₂ e/kg FPCM)
P1	808.280	28.970	0,36
P2	2.130.000	76.470	0,7
P3	1.690.000	60.710	0,66
P4	72.840	2.610	0,21
P5	305.090	10.930	0,27
P6	1.330.000	47.500	0,36
P7	10.490.000	375.890	0,32
P8	183.890	6.590	0,34
P9	4.020.000	144.250	0,36
P10	761.740	27.300	0,85
P11	109.490	3.920	0,41
P12	259.110	9.290	0,41
P13	348.000	12.470	0,42
P14	149.880	5.370	0,45
P15	89.260	3.200	0,7
P16	1.350.000	48.350	0,52
P17	229.240	8.220	0,55
P18	338.900	12.150	0,49
P19	227.550	8.160	0,63

3.2.5 Manejo de dejetos

Considerando o manejo de dejetos, P2 ocupa o topo de Emissões Totais, emissões de CO₂, CH₄ e emissões para FPCM (kg CO₂e/kg FPCM) em Manejo de Dejetos. O único indicador que não se destacou foi em emissões de N₂O, sendo liderado por P9. Neste tópico, as menores emissões foram apresentadas por P15, que possui o menor rebanho do conjunto de dados (Tabela 7).

Tabela 7

Emissões totais, em CO₂, N₂O, CH₄ e para leite produzido e corrigido para gordura e proteína para o indicador Manejo de Dejetos.

Propriedade	Emissão total (kg CO ₂ e)	Emissão de CO ₂ (kg)	Emissão de N ₂ O (kg)	Emissão de CH ₄ (kg)	Emissão para FPCM (kg CO ₂ e/kg FPCM)
P1	1.380.000	113,80	150,74	48.160	0,61
P2	3.130.000	12.340	423,26	107.730	1,02
P3	51.910	0	63,51	1.240	0,02
P4	47.030	2,06	11,67	1.570	0,13
P5	353.390	22,78	53,77	12.140	0,32
P6	1.680.000	3.490	115,57	58.890	0,46
P7	942.460	4.560	1.870	15.290	0,03
P8	217.960	65,59	27,45	7.540	0,40
P9	880.420	546,76	494,14	26.700	0,08
P10	103.970	68,34	271,85	1.060	0,12
P11	29.970	491,91	81,89	255,15	0,11
P12	53.660	0	134,21	610,15	0,08
P13	165.070	2.300	204,42	3.830	0,2
P14	19.050	0	43,72	254,91	0,06
P15	1.100	0	0,06	38,72	0,01
P16	1.470.000	0	458,36	48.270	0,57
P17	324.830	0	51,46	11.140	0,77
P18	395.820	2.300	47,75	13.640	0,58
P19	3.680	0	9,43	39,56	0,01

3.2.6 Energia e processamento

Energia e Processamento trazem P7 com o valor mais significativo para Emissão Total e emissão de CO₂ em Kg. Já para FPCM, P14 e P15 apresentaram os maiores valores (kg CO₂e/kg FPCM). Em N₂O e CH₄ as emissões mensuradas foram nulas (Tabela 8).

Tabela 8

Emissões totais, em CO₂ e para leite produzido e corrigido para gordura e proteína para o indicador Energia e Processamento.

Propriedade	Emissão total (kg CO ₂ e)	Emissão de CO ₂ (kg)	Emissão para FPCM (kg CO ₂ e/kg FPCM)
P1	85.880	85.880	0,04
P2	49.090	49.090	0,02
P3	15.570	15.570	0,01
P4	25.570	25.570	0,07
P5	38.180	38.180	0,03
P6	178.800	178.800	0,05
P7	792.500	792.500	0,02
P8	19.820	19.820	0,04
P9	188.960	188.960	0,02
P10	37.030	37.030	0,04
P11	35.060	35.060	0,13
P12	8.160	8.160	0,01
P13	38.900	38.900	0,05
P14	54.120	54.120	0,16
P15	20.860	20.860	0,16
P16	71.230	71.230	0,03
P17	23.530	23.530	0,06
P18	51.020	51.020	0,07
P19	17.310	17.310	0,05

3.2.7 Transporte

Em Transporte diversas propriedades não relataram o uso de veículos pequenos. Apesar disso, P1 apresentou os maiores números para Emissão Total e emissão de CO₂ em Kg. Para FPCM a propriedade de maior emissão foi P17. Assim, como para Energia e Processamento, CH₄ e N₂O apresentaram emissões zeradas (Tabela 9).

Tabela 9

Emissões totais, em CO₂ e para leite produzido e corrigido para gordura e proteína para o indicador Transporte.

Propriedade	Emissão total (kg CO ₂ e)	Emissão de CO ₂ (kg)	Emissão para FPCM (kg CO ₂ e/kg FPCM)
P1	69.250	69.250	0,03
P2	0	0	0
P3	4.210	4.210	0
P4	1.680	1.680	0
P5	1.180	1.180	0
P6	8.260	8.260	0
P7	36.680	36.680	0
P8	178,03	178,03	0
P9	0	0	0
P10	50.530	50.530	0,06
P11	8.420	8.420	0,03
P12	8.420	8.420	0,01
P13	15.160	15.160	0,02
P14	20.210	20.210	0,06
P15	4.210	4.210	0,03
P16	38.740	38.740	0,02
P17	50.530	50.530	0,12
P18	0	0	0
P19	13,47	13,47	0

Por fim, tem-se a relação da contribuição de cada gás (CO₂, N₂O, CH₄) em CO₂e, nas emissões totais relativas a cada propriedade (Fig. 15). A maioria das propriedades têm CO₂ como gás predominante, seguido de CH₄ e N₂O. Entretanto, em algumas propriedades como P2, P6, P15 e P18 há o metano como gás prevalente; inclusive tendo em P15 o segundo maior presente ser óxido nitroso e, por último, o dióxido de carbono.

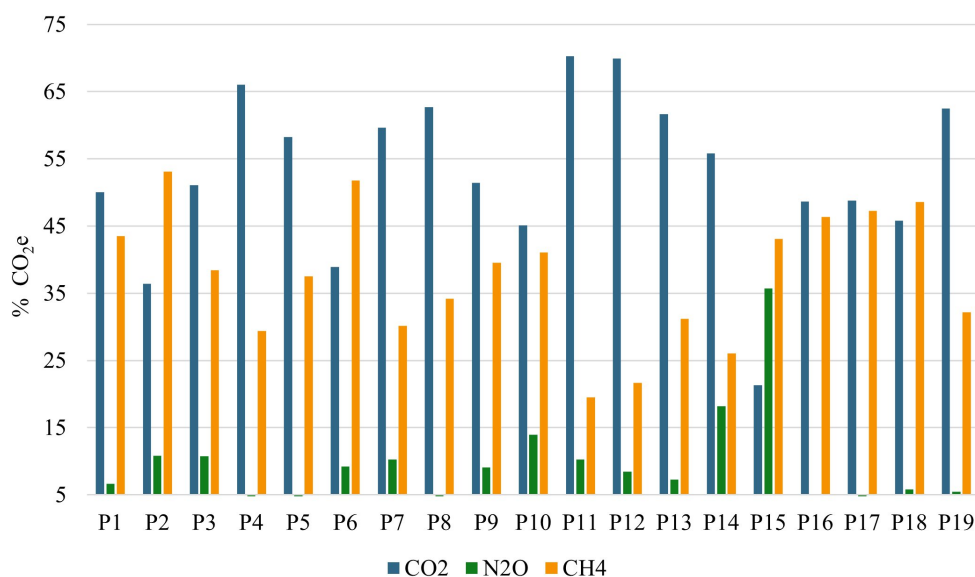


Fig. 15. Nível (%) de contribuição dos GEE, em CO₂e, nas emissões totais.

3.3 Análises comparadas

3.3.1 Análise Comparativa P2 e P3

Na análise comparativa, P2 e P3 possuem produções bastante semelhantes são 35 mil litros de leite que as separam; e o rebanho também difere, apenas por 5 animais. Apesar disso, as emissões distinguem-se em mais de 53,34% (Fig. 16). Em FPCM, a diferença é de 1,43 kg CO₂e/kg FPCM. É interessante apontar que, enquanto P2 possui um rebanho Jersey, P3 tem animais de raça Holandesa.

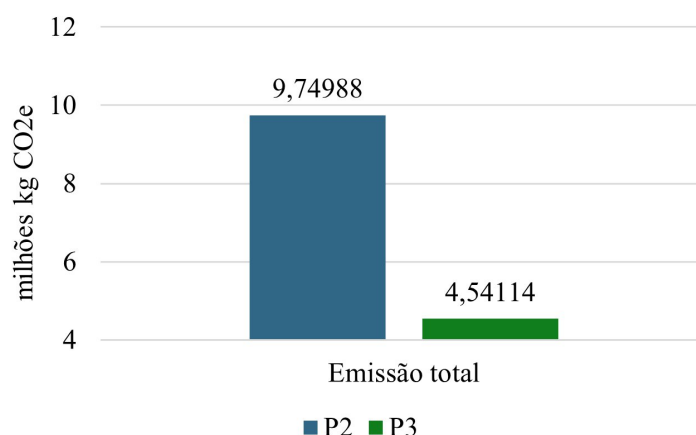


Fig. 16. Emissões totais (kg CO₂e) comparadas entre P2 e P3.

3.3.2 Análise Comparativa de P2, P3 e P10

A análise do número de animais (cabeças) indica que P10 (478), P3 (472) e P2 (477) possuem rebanhos de tamanhos similares. Ainda assim, as emissões totais (kg CO₂e) são bem diferentes, bem como os volumes de produção de leite (kg) (Fig. 17).

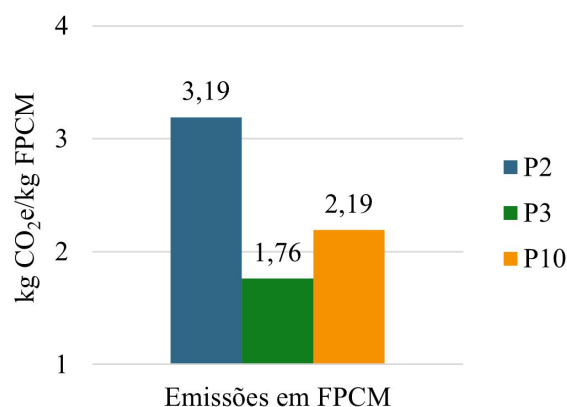


Fig. 17. Emissões por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (FPCM) para 3 propriedades com algumas similaridades.

4. DISCUSSÃO

4.1 Produção de leite e emissões

Através da análise dos resultados obtidos foi possível concluir que propriedades com maior volume de produção de leite, apesar de emitirem as maiores quantidades de GEE, são as que apresentam as emissões mais reduzidas em leite corrigido para gordura e proteína, atestando que o maior volume de produção é capaz de diluir as emissões de GEE. Estes resultados corroboram a hipótese H1 definida nesta pesquisa e são destacados também por Capper & Cady (2020), Min *et al.* (2022), Mech *et al.* (2023) e O'Hara (2023), Chamilete (2024).

Durante Análise de Ciclo de Vida (ACV) como abordagem na avaliação de propriedades que utilizam sistemas de produção de animais a pasto na África do Sul, pesquisadores apontaram que uma produção leiteira mais eficiente é fator crucial na redução das emissões de GEE em sistemas a pasto (Galloway; Swanepoel; Haarhoff, 2024). Em avaliação de dados dos estados de Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Goiás, São Paulo, Paraná e Santa Catarina, Paula *et al.* (2025) identificaram relação inversa entre produtividade animal e Pegada de Carbono (PC), apontando que animais mais produtivos apresentam menor PC.

Em análise promovida pela FAO (2018) observou-se que o incremento na produtividade de leite por vaca é capaz de reduzir a intensidade da emissão de gases de efeito estufa na produção, confirmando os resultados encontrados na comparação entre P5 e P12, e P13 e P18. Mesmo tendo um rebanho de dimensões idênticas, P5 e P12 apresentam emissões totais e em FPCM (kg CO₂e/kg FPCM) distintas; já para P13 e P18, mesmo a primeira tendo um volume de produção expressivamente maior que a segunda, as emissões em FPCM para P13 são significativamente menores. Estas observações podem ser atreladas ao volume de produção, visto que P5 produz um volume 1,68 vezes maior que P12 e P13 produz 1,21 vezes mais que P18 (Koesling *et al.*, 2025).

Segundo Gerber *et al.* (2011), a intensidade das emissões diminui de acordo com o aumento da produção individual, ou seja, a produtividade de uma propriedade relaciona-se de modo inversamente proporcional ao impacto provocado pelas emissões; e isso se deve ao efeito de diluição da manutenção (Capper; Cady; Bauman, 2009). Husband & Martineau (2025) ainda salientam que, se uma mesma quantidade de leite

pode ser alcançada com um número inferior de vacas, as emissões entéricas associadas à manutenção dos animais podem ser atenuadas.

Como constatado na presente pesquisa, P7 apresentou a maior emissão total e emissão de CH₄, sendo também a que apresentou o terceiro menor valor de emissão entérica em FPCM (kg CO₂e/kg FPCM), como atestado previamente por Donadia *et al.* (2023), confirmando que o aumento na produção de leite é capaz de diminuir a intensidade das emissões de CH₄ entérico. Bava *et al.* (2014) também identificaram que características relativas à intensificação da produção, como produção de leite por vaca, estão negativamente associadas ao impacto por kg de produto originado. Estes estudos endossam a ideia de que o volume de produção de leite dilui os impactos das emissões de GEE.

Rotz *et al.* (2024) detectaram que, apesar de a produção de leite por vaca ter aumentado mais de duas vezes, a intensidade de emissões em FPCM a nível nacional diminuiu 42% quando comparados os anos de 2020 e 1971. Ao comparar as emissões em FPCM de P5 e P12 também é possível confirmar o efeito da diluição das emissões na produção. As propriedades apresentam exatamente o mesmo número de animais e P5 possui uma produção 1.6 vezes maior que P12.

Ainda, faz-se importante salientar que as propriedades analisadas neste trabalho não representam a realidade das produções e das propriedades leiteiras no Brasil. Fatores como as dimensões continentais brasileiras, os distintos perfis de produtores, acesso à tecnologias e discrepantes volumes de rebanho, área e produção, refletem em uma heterogeneidade bastante expressiva nos sistemas leiteiros, dificultando representações fieis do sistema produtivo através de amostragem (Vilela *et al.*, 2017; Embrapa, 2022).

4.2 Alimentação, pastejo e emissões

Quando se comparara P2 e P3 com P10, que mesmo possuindo rebanhos de tamanhos semelhantes, P10 possui uma produção significativamente menor que P2 e P3, e elevada emissão em FPCM. Esses dados podem ser justificados porque os animais de P10 não são tão produtivos, em função da dieta fornecida. Em P2 e P3 as dietas contam com alimento concentrado, algo que não está presente na dieta dos animais em P10. Autores confirmam que os níveis de concentrado impactam não só aumentando a

produção dos animais, mas diminuindo a emissão de CH₄ (Sauvant e Giger-Reverdin, 2009; Medeiros e Marino, 2015; Dida; Garcia; Gonzalez, 2024).

Em se tratando da Alimentação, a discrepância acentuada de P7 em relação as demais para o indicador Alimentação, deve-se ao rebanho ser significativamente maior, e quanto maior o número de animais, consequentemente necessita de maior quantidade de alimentos para atender à demanda (Beggs *et al.*, 2019). Animais que produzem mais, geralmente comem, digerem e fermentam mais alimento em seus rumens, o que gera maior emissão de CH₄, por exemplo (Beauchemin *et al.*, 2022). Porém, a necessidade energética da manutenção não se altera em função da produção, fazendo com que um valor estabelecido seja destinado à manutenção das funções corporais. Assim, tendo em vista que em animais de maior produção a ingestão de nutrientes é maior, a proporção destes nutrientes destinados à manutenção é inferior. Em suma, maior teor de nutrientes destinados à produção faz com que a produção de leite seja maior (Capper; Cady; Bauman, 2009; Beauchemin *et al.*, 2022).

Ainda que outras propriedades apresentem maiores valores de emissão total (kg CO₂e) para o indicador Alimentação, o maior registro de emissão em FPCM (kg CO₂e/kg FPCM) foi para P12, em função de seu menor volume de produção quando comparado às demais. P12 e P1 possuem exatamente a mesma composição de itens na dieta; porém P1 possui um volume de produção de leite 3,3 vezes maior que P12, e o dobro de seu rebanho. Assim, quando se analisa as emissões em FPCM, P12, por produzir menor quantidade, resulta em intensidade de emissão superior (Godber *et al.*, 2024).

Dida, Garcia e Gonzalez (2024) em ensaio para averiguar o impacto da suplementação de concentrado na dieta nos índices de CH₄ e N₂O entéricos e de esterco, também observaram que níveis mais elevados de concentrado promoveram aumento de 73% na produção e redução de 14% nas emissões (kg CO₂e/kg FPCM) em comparação à suplementação mais reduzida. O impacto da dieta também foi salientado por Gerber *et al.* (2013), os quais afirmam que a composição do esterco é alterada em função da dieta, interferindo no teor de nitrogênio e de matéria orgânica fermentável.

Ensaio também corroboram o impacto do tipo de sistema de pastejo nas emissões (FAO, 2010; Aguirre-Villegas *et al.*, 2017; Wolf *et al.*, 2017). Os principais Ácidos Graxos Voláteis (AGV) gerados no rúmen são acetato, butirato e propionato (Nascimento *et al.*, 2008; Medeiros & Marino, 2015) havendo, em dietas ricas em fibras (ou de maior concentração de volumoso em comparação ao concentrado) formação

principalmente de acetato (Arya; Modi; Patel, 2024), o precursor da gordura do leite (Medeiros & Marino, 2015). Além disso, dietas majoritariamente fibrosas beneficiam os microrganismos metanogênicos, como as do grupo *Archea*, *Methanobacterium* e *Methanosarcina* (Oliveira *et al.*, 2016) e, dessa forma, propriedades que realizam pastejo ou utilizam forragem como maior porção na alimentação dos animais, contribuem para que estes produzam mais CH₄. Por outro lado, dietas com alto teor de concentrado sofrem uma metanogênese menos significativa (Sauvant & Giger-Reverdin, 2009; Medeiros & Marino, 2015).

Ainda em relação à dieta dos animais, no indicador Pastejo foi possível relacionar as emissões totais e em FPCM ao número de categorias animais em pastejo e ao período que estas ficam a pasto. Em pesquisa conduzida por Aguirre-Villegas *et al.* (2017), os autores sinalizam que a emissão de N₂O do esterco depositado diretamente na pastagem é um ponto que impacta no fator de emissão desse gás, sendo possível relacionar, através desta evidência, que o tempo e as categorias animais em pastejo influenciam as emissões de GEE das propriedades, como observado nos resultados desta pesquisa. Há ainda que considerar as estratégias de manejo de solo e pastagens, as quais comprovadamente impactam não só na qualidade das forragens como nas emissões de CH₄ e N₂O (Aguirre-Villegas *et al.*, 2017; Congio *et al.*, 2018; Congio *et al.*, 2019; Ouatahar *et al.*, 2024). Porém a ferramenta não apresenta um campo específico para inserção deste dado e, portanto, não se torna possível realizar a análise nesta pesquisa.

Também P15, que apresentou a maior emissão em FPCM para o indicador Pastejo, é a propriedade que os animais (bezerros, vacas em lactação e novilhas) passam a maior quantidade de tempo em pastejo e, partindo do exposto por Aguirre-Villegas *et al.* (2017), em função do grande período que os animais estão a pasto e excretam diretamente na pastagem, as emissões poderiam ser mais significativas do que se os animais passassem mais tempo confinados.

Em se tratando da pastagem, as propriedades P4, P5, P8, P9 e P19 não realizam a adubação de suas pastagens e, por esse motivo, as emissões são iguais a zero para estes indicadores. Para as propriedades restantes, que executam adubação nas pastagens, as emissões foram de encontro com a quantidade de produto aplicado, bem como o tipo de fertilizante e a área em que o produto foi aplicado. Ainda que usassem tipos de fertilizantes distintos, todas as propriedades lançam mão de fertilizantes nitrogenados

para as adubações, sendo de conhecimento que estes tipos de fertilizantes possuem um significativo impacto nas emissões de GEE (Galloway; Swanepoel; Haarhoff, 2024).

Dentre os fertilizantes utilizados nas propriedades deste estudo, incluíram ureia, composto NPK, esterco e digestato (resíduo da biodigestão anaeróbica) bovinos (Ferreira-Matos *et al.*, 2020). Segundo resultados obtidos por Lima *et al.* (2022) com gado de corte, ainda que maiores quantidades de fertilizante resultem em maiores taxas de lotação e ganho de peso por animal, os valores das emissões de GEE não são capazes de compensar esses ganhos. Também para os achados de Smit *et al.* (2021), a pegada de carbono aumentou de acordo com o incremento na utilização de fertilizante nitrogenado (Koesling *et al.*, 2025).

4.3 Análise holística das emissões

A necessidade de avaliar as emissões das propriedades não levando apenas em consideração as medidas em FPCM foi confirmada por Chamilete (2024) em estudo que objetivou a comparação, dentre outros parâmetros, do potencial de emissão de CH₄ em sistemas de produção com acesso ao pasto (AC) e sistemas confinados (SC). O autor, constatou que ambas exibiram teores muito próximos de proteína (diferença de 0,04%) e de gordura (0,4%), com SC apresentando maior produção diária de litro de leite por vaca que AC e, ainda sim, SC apresentou emissões em FPCM consideravelmente inferiores à AC (Chamilete, 2024), comprovando os achados de que P7 e P9 foram as que obtiveram menores emissões em FPCM.

Também Wróbel-Jedrzejewska *et al.* (2025), objetivando a mensuração da pegada de carbono geradas nas etapas de processamento de leite em uma indústria de laticínios na Polônia, encontraram a redução de 18% na pegada de carbono (kg CO₂e/kg) para o aumento de 12% na produção. Ainda em relação às emissões em FPCM, segundo a FAO (2018), no ano de 2015 os valores mundiais de FPCM oscilaram entre 1,29 e 6,67 kg CO₂e/kg FPCM. A intensidade de emissão para a América Central e do Sul e o Brasil apresentaram queda ao longo dos 3 anos avaliados, com 3,94 kg CO₂e/kg FPCM em 2005, 3,41 kg CO₂e/kg FPCM em 2010 e 3,36 kg CO₂e/kg FPCM em 2015 (FAO, 2018) e, dessa forma, os valores encontrados nesta pesquisa estariam em consonância com os divulgados pela FAO.

Quanto à diferença existente entre a emissão total e a emissão em FPCM de P4 e P17, uma hipótese pode ser atribuída a predominância de diferentes gases, com diferentes potenciais poluidores (GWP). Para todos os indicadores (Pastejo, Fertilização

de Pastagens, Alimentação, Fermentação Entérica, Manejo de Dejetos, Energia e Processamento e Transporte), quando segregados pelos gases mensurados (CO_2 , N_2O , CH_4), P17 apresenta os maiores valores de emissão. Como visto anteriormente, o GWP de CH_4 e N_2O , é respectivamente, 28 e 273 (Al Khourdajie *et al.*, 2022). Ao multiplicar os valores obtidos pelos respectivos GWP, obtém o CO_2e para cada gás e é possível mensurar o impacto real, de forma mais justa. Por meio dessa equação é possível observar o porquê, mesmo com volumes de produção e tamanho de rebanho semelhantes, P17 e P4 apresentam valores tão distintos de emissão.

4.4 Manejo de esterco e emissões

Pelton *et al.* (2025) e Gerber *et al.* (2013) salientam que variáveis como manejo de esterco e volume de produção leiteira impactam as emissões em FPCM, e produções de leite inferiores aumentam a intensidade de emissões por quilo de FPCM. Em comparação referente às emissões oriundas de manejo de esterco nos anos de 1992 e 2012, Wightman & Woodbury (2016) observaram que, ainda que a eficiência na produção leiteira tenha aumentado e, com isso, reduzido as emissões potenciais do rebanho, o aumento na proporção de propriedades que realizavam armazenamento anaeróbico dos dejetos foi responsável por aumentar consideravelmente as emissões de GEE. Há, ainda, sinalização de que realizar a Distribuição Diária de dejetos resultaria em menores emissões do que utilizar biodigestor anaeróbico (Wightman & Woodbury, 2016).

O achado de Wightman & Woodbury (2016) corrobora os resultados obtidos neste estudo. P3 e P2 possuem um rebanho de tamanho similar, mas as emissões para Manejo de Dejetos de P3, em FPCM, é bem menor. Uma justificativa para tal, seria que P3 realiza apenas Distribuição Diária, enquanto P2 apresenta Lagoa Anaeróbica Descoberta para os dejetos advindos das vacas em lactação e dos bezerros leiteiros. Além disso, diferentemente das Lagoas Cobertas, a Lagoa Anaeróbica Descoberta não realiza a captura dos GEE (DeGarie *et al.*, 2000; Bohrz, 2010; AMPC; MLA, 2017), o que explicaria a emissão ser mais significativa do que a apresentada pela Distribuição Diária. Em estudo de Kupper *et al.* (2020), verificou que os tratamentos que possuíam cobertura tendem a exibir menores emissões totais de GEE.

4.5 Raça, fisiologia, teor de gordura no leite e emissões

A justificativa para a diferença nas emissões entre P2 e P3 também pode partir de que estas propriedades utilizam raças distintas nos rebanhos, corroborando com a hipótese H2 definida nesta pesquisa. Enquanto P3 utiliza a raça Holandesa, P2 utiliza Jersey, uma raça cuja uma das principais características é um teor de gordura no leite maior (Sanjayaranj *et al.*, 2023). Um maior teor de gordura no leite pode estar atrelado à maiores emissões, como é possível inferir através de equações utilizadas para o cálculo de FPCM (Vellinga; Gerber; Opio, 2010; Williams *et al.*, 2014; IDF, 2022).

Equação 1 (IDF, 2022):

$$\text{FPCM (kg)} = \text{produção de leite (kg)} \times [0,1226 \times \text{teor de gordura \%} + 0,0776 \times \text{teor de proteína \%} + 0,2534]$$

Equação 2 (Vellinga; Gerber; Opio, 2010):

$$\text{FPCM (kg)} = \text{leite cru (kg)} \times (0,337 + 0,116 \times \text{teor de gordura \%} + 0,06 \times \text{teor de proteína \%})$$

De acordo com resultados de Chamilete (2024), o maior teor de gordura no leite foi encontrado no sistema que apresentou maior intensidade de emissão de GEE em FPCM. Autores como Rico *et al.* (2016) e Bittante & Bergamaschi (2019) ainda encontraram correlação positiva entre ácidos graxos no leite (como iso-palmitico) e as emissões entéricas de CH₄.

Por possuir o menor rebanho dentre as propriedades pesquisadas, bem como o menor volume de leite anual produzido, além de ser a propriedade com menor número de animais e em que todas as categorias realizam pastejo pelo menos 300 dias no ano, em período integral -, P15 ainda está entre as propriedades de maior emissão total (kg CO₂e) e apresenta o maior FPCM para esse indicador. Já P7 produz o maior volume de leite anual apresentando, para o indicador Pastejo, a segunda maior emissão total (kg CO₂e) e uma emissão em FPCM (kg CO₂e/ kg FPCM) igual a zero. Estes pontos reforçam as hipóteses deste trabalho de que a produção dilui a emissão.

Já para fermentação entérica concluiu-se, na maioria dos estudos realizados, que esta seria a maior fonte de emissões dentro das produções (Mc Geough *et al.*, 2012; Tongwane & Moeletsi, 2021; Brasil, 2022; Ruiz-Llontop *et al.*, 2022; Vidican *et al.*, 2022; Almeida, 2023; Mech *et al.*, 2023; Villanueva *et al.*, 2023; Olivo *et al.*, 2024; Godber *et al.*, 2025; Husband & Martineau, 2025). Entretanto, neste estudo foi possível averiguar que as emissões decorrentes da produção de alimentos é, quase que na totalidade, a principal fonte de emissão das propriedades, o que também foi notado por

Grossi *et al.* (2019). Como provável justificativa para este achado, Godber *et al.* (2025) relata que as emissões observadas para a produção de alimentos podem ser super ou subestimadas em razão de algumas variáveis como mudanças no uso da terra, produtividade agrícola, utilização de fertilizantes, manejo de solo e uso de espécies vegetais de cobertura, as quais podem eclipsar as condições de produção.

4.6 Contribuição dos indicadores “Energia e Processamento” e “Transporte”

Quanto às contribuições de Energia e Processamento, essas corresponderam entre 0,49 e 9,7% das emissões em FPCM das propriedades. Olivo *et al.* (2024) encontraram, para 6 fazendas leiteiras orgânicas em Nova Iorque (EUA), valores de 6 a 18% da contribuição deste mesmo indicador para suas propriedades. Os mesmos autores sinalizam que, devido à baixa influência de Energia e Processamento, ainda que sejam feitas alterações nas fontes de energia, seu impacto nos GEEs seria baixo, porém necessário destacar que existem, e toda alternativa de mitigação é válida (Olivo *et al.*, 2024). Todde *et al.* (2018), ainda aponta que, mesmo maiores produções demandem maior quantidade de energia, a PC destas é reduzida em função da maior produção de leite (Godber *et al.*, 2025).

Por fim, Transporte obteve as menores emissões em FPCM nas propriedades, com valores oscilando entre 0 e 0,12% de contribuição. Essa baixa contribuição também foi relatada por Olivo *et al.* (2024) e Godber *et al.* (2025).

5. CONCLUSÃO

Objetivando a estimativa de gases de efeito estufa (GEE) e a comparação com características de fazendas leiteiras, constatou-se que nas fazendas analisadas, maiores volumes de produção de leite diluiriam as emissões de GEE, e que o padrão genético dos animais impacta nestas emissões de gases de efeito estufa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização da estimativa dos GEE em fazendas leiteiras é fundamental para compreender o potencial emissor dos sistemas produtivos, bem como possibilitar sua caracterização. Por meio dos dados obtidos neste estudo, é possível fornecer um retorno aos produtores sobre as emissões, viabilizando, assim, a elaboração de estratégias de mitigação e adoção de práticas produtivas que tornem a propriedade mais sustentável, contribuindo com a Agenda 2030 e auxiliando no refreamento dos eventos extremos advindos do aquecimento global.

Algo também percebido neste trabalho (e depois observado em literatura), foi o impacto da dieta, e especialmente do concentrado na emissão de gases estufa, com este alimento sendo atrelado à menor metanogênese no rúmen dos animais, quando comparado à alimentação mais fibrosa. Quanto ao padrão genético, acredita-se que leites com teores mais elevados de gordura são responsáveis por maior emissão, o que também foi sinalizado em literatura e cuja justificativa poderia estar atrelada ao fato de o precursor do leite ser acetato, que é produzido em maior proporção no rúmen mediante alimentação mais fibrosa, observando que autores correlacionaram com metanogênese mais intensa.

A CFT apresenta pontos positivos, como a facilidade de manipulação e entendimento, bem como a possibilidade de algumas avaliações de forma gratuita. Porém, há limitações encontradas no uso da ferramenta. Uma delas é a ferramenta ser construída para uma realidade diferente da brasileira, em relação aos alimentos fornecidos, raças utilizadas e até mesmo meios de transporte.

Ainda que apresente ampla gama de opções, é perceptível a ausência de componentes que fazem parte da agropecuária nacional. Também há de apontar que o projeto foi conduzido em propriedades das regiões Sul e Sudeste, as quais não representam toda a diversidade contida no Brasil – um país de proporções continentais. Outro ponto interessante, seria a inclusão das estimativas de sequestro dos gases na

propriedade, uma vez que o site sinaliza a realização de estimativas de emissão e captura de GEE. Também neste sentido, seria importante que os idealizadores na ferramenta disponibilizassem maiores informações (observando, evidentemente, a confidencialidade inerente à ferramenta e seus segredos comerciais) a respeito dos componentes tidos em consideração para a realização dos cálculos.

Qual o alcance da ferramenta e quais níveis de impacto são considerados? Emissões indiretas das produções também são contabilizadas? Estes pontos de melhoria seriam de grande contribuição para tornar a ferramenta mais abrangente quanto aos inúmeros e distintos locais, métodos e sistemas de produção, rebanhos e as infinitas variáveis que compõem as produções leiteiras ao redor do mundo.

Dentre os pontos de recomendação, há a importância da produtividade para diluição das emissões. Assim, quanto mais produtiva for uma propriedade, menores seriam os impactos referentes à emissão de GEE. Entretanto, há um ápice de produção que pode ser atingido de acordo com as características e limitações das propriedades e, portanto, o aumento de produtividade não pode ser a única saída para os produtores que desejam tornar suas produções mais sustentáveis.

Dessa forma, tendo em vista os resultados observados, os produtores podem optar por alterações na dieta; no manejo de pastagem e fertilização; instalação de placas solares sob estruturas (como no telhado do *compost barn*, por exemplo) para geração de energia. Também uma alternativa de geração de energia é o biogás oriundo dos biodigestores, que ainda podem prover melhorias quanto ao manejo de dejetos, uma vez que se destina mais adequadamente os resíduos gerados na produção; bem como a geração de biofertilizante líquido a ser utilizado para adubação das lavouras e áreas de pastagem.

Ainda que os objetivos deste trabalho tenham sido alcançados, é importante que os estudos acerca desta temática sejam continuados. Comparações entre diferentes raças, genéticas e composições do leite são necessárias para que efetivamente confirmem as diferenças de emissões resultantes destas características. Também são necessários estudos acerca de alternativas de mitigação para pequenos produtores. Sabe-se que a produção dilui a emissão, porém é de fundamental importância que pequenas produções sejam contempladas com metodologias sustentáveis a fim de que todo e qualquer setor na produção leiteira possa auxiliar no combate às emissões de GEE, resultando em produção de alimentos menos danosa ao planeta e as futuras gerações.

REFERÊNCIAS

Aguirre-Villegas, H. A. *et al.*, 2017. Grazing intensity affects the environmental impact of dairy systems. *Journal of Dairy Science*. 100 (8), 6804-6821.
<https://doi.org/10.3168/jds.2016-12325>.

Al Khourdajie, A. *et al.*, 2022. IPCC, Annex II: Definitions, Units and Conventions. *In*: Shukla, P. R.; Skea, J.; Slade, R.; Al Khourdajie, A.; van Diemen, R.; McCollum, D.; Pathak, M.; Some, S.; Vyas, P.; Fradera, R.; Belkacemi, M.; Hasija, A.; Lisboa, G.; Luz, S.; Malley, J. IPCC, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 1821-1840.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Annex-II.pdf.

Alexandropoulos, E. *et al.*, 2023. Decision Support Systems Based on Gaseous Emissions and Their Impact on the Sustainability Assessment at the Livestock Farm Level: An Evaluation from the User's Side. *Sustainability*. 15 (17), 13041.
<https://doi.org/10.3390/su151713041>.

Almeida, T. F. A. de, 2023. Estimativa do balanço de gases do efeito estufa em propriedade leiteira integrada com a produção vegetal: a partir das ferramentas GHG Protocol Agricultura e Florestas, e Cool Farm Tool. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Nutrição e Produção Animal da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia. Pirassununga.
<https://doi.org/10.11606/D.10.2023.tde-18122023-125900>.

Arya, A.; Modi, R. J.; Patel, Y., 2024. Rumen fermentation. *International Journal of Veterinary Sciences and Animal Husbandry*. 9 (5), 9-12.
<http://dx.doi.org/10.22271/veterinary.2024.v9.i5a.1639>.

Assad, E. D. *et al.*, 2019b. Papel do plano ABC e do Planaveg na adaptação da agricultura e da pecuária às mudanças climáticas. Working Paper. São Paulo, Brasil: WRI Brasil.
https://www.wribrasil.org.br/sites/default/files/AF_WRI_WorkingPaper_MudancasClimaticas_SumarioExecutivo_DIGITAL.pdf.

Auad, A. M.; Fonseca, M. das G.; Resende, T. T., 2017. Efeito do aquecimento global sobre pragas das pastagens. *In*: Bettiol, W.; Hamada, E.; Angelotti, F.; Auad, A. M.; Ghini, R (ed.). Aquecimento Global e Problemas Fitossanitários. 1ª ed. Brasília, DF: Embrapa, p. 380-409.
<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1077623/1/2017LV03.pdf>.

Australian Meat Processor Corporation (AMPC); Meat & Livestock Australia (MLA), 2017. Covered Anaerobic Lagoons Meat Industry Applications.
https://www.ampc.com.au/media/s4godbck/ampc_coveredanaerobiclagoons_finalreport.pdf.

Bajodek, M. *et al.*, 2024. Cows' milk composition in relation to age, lactation stage and genetically modified feed. *Folia Pomeranae Universitatis Technologiae Stetinensis*.

Agricultura, Alimentaria, Piscaria et Zootechnica, 70 (2).
<http://dx.doi.org/10.21005/AAPZ2024.70.2.1>.

Bava, L. *et al.*, 2014. How can farming intensification affect the environmental impact of milk production?. *Journal of Dairy Science*. 97 (7), 4579-4593.
<https://doi.org/10.3168/jds.2013-7530>.

Beauchemin, K. *et al.*, 2022. Invited review: Current enteric methane mitigation options. *Journal of Dairy Science*. 105 (12), 9297-9326.
<https://doi.org/10.3168/jds.2022-22091>.

Beggs, D. S. *et al.*, 2019. The effects of herd size on the welfare of dairy cows in pasture-based system using animal – and resource – based indicators. *Journal of Dairy Science*. 102 (4). 3406-3420. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14850>.

Benedet, A. *et al.*, 2020. Variation of Blood Metabolites of Brown Swiss, Holstein-Friesian, and Simmental Cows. *Animals*. 10 (2). <https://doi.org/10.3390/ani10020271>.

Bittante, G. & Bergamaschi, M., 2020. Enteric Methane Emissions of Dairy Cows Predicted from Fatty Acid Profiles of Milk, Cream, Cheese, Ricotta, Whey, and Scotta. *Animals*. 10 (1). <https://doi.org/10.3390/ani10010061>.

Bohrz, G. I., 2010. Geração de metano em lagoa anaeróbia: um estudo de caso em abatedouro de bovinos. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.
<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7945/BOHRZ%2c%20GABRIELI%20%20IRRIGARAY.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Boland, T. M. *et al.*, 2020. Feed Intake, Methane Emissions, Milk Production and Rumen Methanogen Populations of Grazing Dairy Cows Supplemented with Various C 18 Fatty Acid Sources. *Animals*. 10 (12). <https://doi.org/10.3390/ani10122380>.

Bouteska, A. *et al.*, 2024. Impacts of the changing climate on agricultural productivity and food security: Evidence from Ethiopia. *Journal of Cleaner Production*. 449.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141793>.

Capper, J. L. & Cady, R. A., 2020 The effects of improved performance in the U.S. dairy cattle industry on environmental impacts between 2007 and 2017. *Journal of Animal Science*. 98 (1). <https://doi.org/10.1093/jas/skz291>.

Capper, J. L.; Cady, R. A.; Bauman, D. E., 2009. The environmental impact of dairy production: 1944 compared with 2007. *Journal of Animal Science*. 87 (6), 2160-2167.
<https://doi.org/10.2527/jas.2009-1781>.

Caro, D., 2019. Carbon Footprint. *In*: Fath, B. (Ed.). *Encyclopedia of Ecology*. 2 ed. Elsevier, 252-257. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10752-3>.

Carter, S.; Gulati, M., 2014. Understanding the Food Energy Water Nexus: Climate change, the Food Energy Water Nexus and food security in South Africa. British High Comission Pretoria, África do Sul: WWF.
http://awsassets.wwf.org.za/downloads/1__a16231_wwf_climate_change_few_and_food_security_in_sa_online.pdf.

Chamilete, S. A. M., 2024. Balanço de gases de efeito estufa em sistemas leiteiros de clima tropical. 115 f. Dissertação (Mestrado em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas e Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Araraquara, SP, 2024. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1167525>.

Cintra, P. H. N.; Melo, O. F. P. de; Menezes, J. O. S. de., 2020. Produção agrícola: uma revisão bibliográfica sobre as mudanças climáticas e produtividade de plantas graníferas no Brasil. *Revista Agrotecnologia*. 11 (1) 87-94. <https://www.revista.ueg.br/index.php/agrotecnologia/article/view/9720>.

Congio, G. F. S. *et al.*, 2018. Strategic grazing management towards sustainable intensification at tropical pasture-based dairy systems. *Science of the Total Environment*. 636, 872-880. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.301>.

Congio, G. F. S. *et al.*, 2019. Strategic grazing management and nitrous oxide fluxes from pasture soils in tropical dairy systems. *Science of the Total Environment*. 676, 493-500. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.186>.

Cool Farm Tool (CFT), 2024. <https://coolfarm.org/>. Acesso em: 25 jan. 2024.

Cool Farm Tool (CFT), 2025. About the Alliance. <https://coolfarm.org/about-us/>. Acesso em: 12 mar. 2025.

Costa, F. de S. *et al.*, 2006. Métodos para avaliação das emissões de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera. *Ciência Rural*. 36 (2), 693-700. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000200056>.

Cuadra, S. V. *et al.*, 2018. Mudanças climáticas e a agropecuária brasileira. *In*: Cuadra, S. V.; Heinemann, A. B.; Barioni, L. G.; Mozzer, G. B.; Bergier, I. (ed.). Ação contra a mudança global do clima: contribuições da Embrapa. Brasília, DF : Embrapa pp. 23-30. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1090720/1/ODS13.pdf>.

Cunha, D. A. da; Braga, M. J., 2022. Agricultura e mudança climática. *In*: Cunha, D. A. da; Braga, M. J. Mudanças climáticas e convivência com o semiárido brasileiro. Viçosa, MG : IPPDS, UFV, pp. 7-16. <https://bibliotecasemiarios.ufv.br/bitstream/123456789/68/1/cartilha%20e%20letr%C3%B4nica.pdf>. Acesso em: 12 maio 2025.

DeGarie, C. J *et al.*, 2000. Floating geomembrane covers for odour control and biogas collection and utilization in municipal lagoons. *Water Science and Technology*. 42 (10), 291-298. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0664>.

Delfino, J. L. C.; *et al.*, 2020. Influência do sistema de produção na produtividade de leite no interior do estado de São Paulo, Brasil. *Veterinária e Zootecnia, Botucatu*. 27, 1-11. <https://doi.org/10.35172/rvz.2020.v27.506>.

Dida, M. F.; Garcia, S. C.; Gonzalez, L. A., 2024. Dietary concentrate supplementation increases milk production and reduces predicted greenhouse gas emission intensity in pasture-based commercial dairy farms. *Journal of Dairy Science*. 107 (8), 5639-5652, <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24303>.

- Doidge, C. *et al.*, 2024. A Living lab approach to understanding dairy farmers' technology and data needs to improve herd health: Focus groups from 6 European countries. *Journal of Dairy Science*. 107 (8), 5754-5778. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-24155>.
- Donadia, A. B. *et al.*, 2023. Factors Affecting Enteric Emission Methane and Predictive Models for Dairy Cows. *Animals*. 13 (11). <https://doi.org/10.3390/ani13111857>.
- Edwards, K. Y. *et al.*, 2024. Barriers to recording calf health data on dairy farms in Ontario. *Journal of Dairy Science Communications*. 5, 42-46. <https://doi.org/10.3168/jdsc.2023-0398>.
- Eijndhoven, M. H. T. M.-V. *et al.*, 2013. Differences in milk fat composition predicted by mid-infrared spectrometry among dairy cattle breeds in the Netherlands. *Journal of Dairy Science*. 96 (4), 2570-2582. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5793>.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Anuário Leite 2022: pecuária leiteira de precisão. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2022. 114 pp. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1144110>.
- Evangelista, B. A. *et al.*, 2022. Possíveis Impactos das Mudanças Climáticas Sobre o Zoneamento Agrícola de Risco Climático da Cultura da Soja no Estado do Tocantins. In: Collicchio, E.; Rocha, H. R. da (org.). *Agricultura e Mudanças do Clima no Estado do Tocantins: Vulnerabilidades, Projeções e Desenvolvimento*. Palmas, TO : Editora Universitária – EdUFT, pp. 167-184. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1143011/1/cap7.pdf>. Acesso em: 12 maio de 2025.
- Ferreira-Matos, C. *et al.*, 2020. Efeito da aplicação de digestato bovino nas características do solo Planossolo Háplico no município de Seropédica – RJ. *RedBioLAC*, (4), 14-18. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1127568>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- Food and Agriculture Organization of the United States (FAO), 2018. *Climate Change and the Global Dairy Cattle Sector: The Role of the Dairy Sector in a Low-Carbon Future*. Roma: Food and Agriculture Organization and Global Dairy Platform. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca2929en>. Acesso em: 07 jun. 2025.
- Food and Agriculture Organization of the United States (FAO), 2010. *Greenhouse Gas Emissions from the Dairy Sector: A Life Cycle Assessment*. Disponível em: <https://www.fao.org/4/k7930e/k7930e00.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2025.
- Fundação Getúlio Vargas (FGV), 2025. Programa Brasileiro GHG Protocol. Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>. Acesso em: 12 mar. 2025.
- Galloway, C.; Swanepoel, P. A.; Haarhoff, S. J., 2024. A carbon footprint assessment for pasture-based dairy farming systems in South Africa. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1333981>.

Garnsworthy, P. C. *et al.*, 2012. Variation among individual dairy cows in methane measurements made on farm during milking. *Journal of Dairy Science*. 95 (6), 3181-3189. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4606>.

Gerber, P. J. *et al.*, 2013. Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: a review. *Animal*. 7 (2), 220-234. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000876>.

Gerber, P. *et al.*, 2011. Productivity gains and greenhouse gas emissions intensity in dairy systems. *Livestock Science*. 139 (1-2), 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.03.012>.

Godber, O. F. *et al.*, 2025. Farm-gate greenhouse gas emission intensity for medium to large New York dairy farms. *Journal of Dairy Science*. 108 (5), 5039-5060. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25874>.

Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol), 2004. The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. Washington, USA. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2025.

Grossi, G. *et al.*, 2019. Livestock and climate change: impact of livestock on climate and mitigation strategies. *Animal Frontiers*. 9 (1), 69-76. <https://doi.org/10.1093/af/vfy034>.

Herrera, N. *et al.*, 2024. Employee perception of precision technology use at the dairy farm. *Translational Animal Science*. 8. <https://doi.org/10.1093/tas/txae036>.

Hoekstra, A. Y. *et al.*, 2011. O conceito de pegada hídrica. In: Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A. K.; Aladaya, M. M.; Mekonnen, M. M. *Manual de Avaliação da Pegada Hídrica – Estabelecendo o Padrão Global*. Editora Earthscan, pp. 2-3. Disponível em: <https://ayhoekstra.nl/pubs/Hoekstra-et-al-2013-ManualDeAvaliacaoDaPegadaHidrica.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2023.

Hosseini-Zadeh, N. G., 2022. Estimates of the genetic contribution to methane emission in dairy cows: a meta-analysis. *Scientific Reports*. 12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16778-z>.

Husband, J. & Martineau, H. Greenhouse gases and sustainability: using data to monitor progress on dairy farms. *In Practice*. 47 (2), 81-88. <https://doi.org/10.1002/inpr.517>.

Iamaguti, J. L. *et al.*, 2015. Preparo do solo e emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo em área canavieira. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 19 (5), 497-504. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p497-504>.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023. *Mudança do Clima 2023: Relatório Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima*. IPCC, Genebra, Suíça. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport_PO.pdf. Acesso em: 12 maio 2025.

Kamalanathan, S. *et al.*, 2023. Genetic Analysis of Methane Emission Traits in Holstein Dairy Cattle. *Animals*. 13 (8). <https://doi.org/10.3390/ani13081308>.

Koesling, M. *et al.*, 2025. Environmental impact and economic performance of Norwegian dairy farms. *Science of the Total Environment*. 98. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179609>.

Kramer, K. & Bovenkerk, B., 2024. Dairy farming technologies and the agency of cows. *Animal*. 18 (6). <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101191>.

Lahlali, R. *et al.*, 2024. Effects of climate change on plant pathogens and host-pathogen interactions. *Crop and Environment*. 3 (3), 159-170. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2024.05.003>.

Lima, L. *et al.*, 2022. Response of Pasture Nitrogen Fertilization on Greenhouse Gas Emission and Net Protein Contribution of Nellore Young Bulls. *Animals*. 12 (22). <https://doi.org/10.3390/ani12223173>.

MacSween, K. & Feliciano, D., 2018. Comparison of online greenhouse gas accounting tools for agriculture. CCAFS INFO NOTE. Disponível em: <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/bbc258e6-7397-469f-8981-2535507a6994/content>. Acesso em: 25 jan. 2024.

Mazzetto, A. M.; Falconer, S.; Ledgard, S., 2022. Mapping the carbon footprint of milk production from cattle: A systematic review. *Journal of Dairy Science*. 105 (12), 9713-9725. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22117>.

Mech, A. *et al.*, 2023. Assessment of carbon footprint of milk production and identification of its major determinants in smallholder dairy farms in Karnataka, India. *Journal of Dairy Science*. 106 (12), 8847-8860. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22153>.

Medeiros, S. R. de & Marino, C. T., 2015. Carboidratos na nutrição de gado de corte. *In: Medeiros, S. R. de; Gomes, R. da C.; Bungenstab, D. J. (Ed.). Nutrição de bovinos de corte: fundamentos e aplicações*. Brasília, DF: Embrapa, p. 45-62. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1011216>. Acesso em: 22 jun. 2025.

Min, B.-R. *et al.*, 2022. Enteric Methane Emissions and Animal Performance in Dairy and Beef Cattle Production: Strategies, Opportunities, and Impact of Reducing Emissions. *Animals*. 12 (8). <https://doi.org/10.3390/ani12080948>.

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicação (MCTI), 2022. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 5ª ed. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicação. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2024.

Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2016. Mudança do clima observada e futura. *In: Ministério do Meio Ambiente (MMA). Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima: volume 1: Estratégia Geral*. Portaria MMA nº 150 de 10 de maio de 2016. Brasília : MMA, pp. 10-17. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt->

br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biomas-e-ecossistemas/biomas/arquivos-biomas/plano-nacional-de-adaptacao-a-mudanca-do-clima-pna-vol-i.pdf. Acesso em: 12 maio 2025.

Nascimento, M. L. do *et al.*, 2008. Fontes de energia, processamento de grãos e sítio de digestão do amido correlacionados com o acréscimo de gordura nos diferentes depósitos corporais de ruminantes. *Revista Eletrônica de Veterinária*. 9 (4), 1-17. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63611952013>.

Natural Resource Ecology Laboratory (NREL), 2024. Agriculture and Land Use National Greenhouse Gas Inventory Software Program (ALU). Disponível em: <https://www.nrel.colostate.edu/projects/alusoftware/download-software.php>. Acesso em: 25 jan. 2024.

O'Hara, J. K., 2023. State-level trends in the greenhouse gas emission intensity of US milk production. *Journal of Dairy Science*. 106 (8), 5474-5484. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22741>.

Olijhoek, D. W. *et al.*, 2022. Feeding up to 91% concentrate to Holstein and Jersey dairy cows: Effects on enteric methane emission, rumen fermentation and bacterial community, digestibility, production, and feeding behavior. *Journal of Dairy Science*. 105 (12), 9523-9541. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21676>.

Oliveira, V. da S. *et al.*, 2016. Carboidratos fibrosos e não fibrosos na dieta de ruminantes e seus efeitos sobre a microbiota ruminal. *Veterinária Notícias*. 22 (2). <https://doi.org/10.14393/VTv22n2a2016.32660>.

Olivo, A. J. *et al.*, 2024. Greenhouse gas emissions and nutrient use efficiency assessment of 6 New York organic dairies. *Journal of Dairy Science*. 107 (11), 9527-9548. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25004>.

Onhinam, S. F., 2022. Alterações climáticas e seus impactos na agricultura e oferta de alimentos: uma revisão sistemática da literatura. 39 f. Monografia (Curso de Ciências Biológicas, Instituto de Ciências Exatas e da Natureza) - Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unilab.edu.br/jspui/bitstream/123456789/4312/1/SIOZIMILA%20FERNANDES%20ONHINAM.pdf>. Acesso em: 13 maio 2025.

Ouatahar, L. *et al.*, 2024. An integral assessment of the impact of diet and manure management on whole-farm greenhouse gas and nitrogen emissions in dairy cattle production systems using process-based models. *Waste Management*. 187, 79-90. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.07.007>.

Palhares, J. C. P., 2021. Amontoamento de resíduos orgânicos. Embrapa Pecuária Sudeste. Comunicado técnico, 109. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste. 9 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1136512>. Acesso em: 21 jun. 2025.

Pandolfo, C. *et al.*, 2014. Aquecimento global e seus impactos no zoneamento climático da macieira de média exigência de frio na região Sul do Brasil. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*. 20 (1/2), 131-137. <https://revistapag.agricultura.rs.gov.br/ojs/index.php/revistapag/article/view/104/80>.

- Paula, V. R. de *et al.*, 2025. Pegada de carbono do leite brasileiro. Documentos, 293. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite. 9 p. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1174976/pegada-de-carbono-do-leite-brasileiro?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 13 jun. 2025.
- Pelton, R. *et al.*, 2025. Spatially Resolved Greenhouse Gas Emissions of U. S. Milk Production in 2020. *Environmental Science & Technology*. 59 (19), 9552-9564. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c01166>.
- Perasso, V., 2016. O que é a 4ª revolução industrial - e como ela deve afetar nossas vidas. BBC NEWS Brasil. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-37658309>. Acesso em: 01 nov. 2024.
- Pinheiro, E. F. M. *et al.*, 2023. Tratamento aeróbio e anaeróbio da biomassa: do desperdício à obtenção de matérias-primas que reciclam nutrientes e energia. *In*: Silva, A. T. B.; Santos, E. D.; Mello, R. G. Agroecologia: Diálogos sobre pesquisas, estudos e práticas estratégicas nas ciências agrárias. Rio de Janeiro, RJ: e-Publicar. pp. 183-216. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.47402/ed.ep.c2022173414856>. Acesso em: 21 jun. 2025.
- Prajapati, M. C. *et al.*, 2022. Economic Development of Milk Producers through Dairy Cooperatives with Special Reference to Banaskantha District. *Economic Affairs*. 67 (4), 297-300. <http://dx.doi.org/10.46852/0424-2513.3.2022.21>.
- Rahi, S. Research Design and Methods: A Systematic Review of Research Paradigms, Sampling Issues and Instruments Development. *International Journal of Economics & Management Sciences*. 6 (2). <http://dx.doi.org/10.4172/2162-6359.1000403>.
- Raza, M. M. & Bebbler, D. P., 2022. Climate change and plant pathogens. *Current Opinion in Microbiology*. 70. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2022.102233>.
- Rico, D. E. *et al.*, 2016. Prediction of enteric methane emissions from Holstein dairy cows fed various forage sources. *Animal*. 10 (2), 203-21. <https://doi.org/10.1017/S1751731115001949>.
- Rotz, C. A. *et al.*, 2024. Fifty years of environmental progress for United States dairy farms. *Journal of Dairy Science*. 107 (6), 3651-3668. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24185>.
- Ruiz-Llontop, D. *et al.*, 2022. Milk carbon footprint of silvopastoral dairy systems in the Northern Peruvian Amazon. *Tropical Animal Health and Production*. 54 (227). <https://doi.org/10.1007/s11250-022-03224-5>.
- Salou, T.; Le Mouél, C.; van der Werf, H. M. G., 2017. Environmental impacts of dairy system intensification: the functional unit matters!. *Journal of Cleaner Production*. 140, 445-454. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.019>.
- Salzano, A. *et al.*, 2022. Breed and Feeding System Impact the Bioactive Anti-Inflammatory Properties of Bovine Milk. *International Journal of Molecular Sciences*. 23 (19), <https://doi.org/10.3390/ijms231911088>.

Sanjayanjan, I. *et al.*, 2023. A Study of Milk Composition and Coagulation Properties of Holstein-Friesian, Jersey and Their Cross Milked Once or Twice a Day. *Dairy*. 4 (1), 167-179. <https://doi.org/10.3390/dairy4010012>.

Sauvant, D. & Giger-Reverdin, S., 2009. Modélisation des interações digestivas et de la production de méthane chez les ruminants. *INRAE Productions Animales*. 22 (5), 375-384. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2009.22.5.3362>.

Silvestre, T. *et al.*, 2021. Effects of Feeding Level and Breed Composition on Intake, Digestibility, and Methane Emissions of Dairy Heifers. *Animals*. 11 (3), 1-11. <https://doi.org/10.3390/ani11030586>.

Singh, B. K. *et al.*, 2023. Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nature Reviews Microbiology*. 21, 640-656. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7>.

Smit, H. P. J. *et al.*, 2021. Environmental Impact of Rotationally Grazed Pastures at Different Management Intensities in South Africa. *Animals*. 11 (5). <https://doi.org/10.3390/ani11051214>.

Soares, P. *et al.*, 2021. Efeitos do sistema de criação na incidência de diarreia, metabolismo e performance de bezerras leiteiras no sul do Brasil. *Medicina Veterinária*. 15 (2), 82-87. <https://doi.org/10.26605/medvet-v15n2-2647>.

Sodré, C. F. L.; Silva, Y. J. A. da; Monteiro, I. P., 2016. Acidificação dos Oceanos: fenômeno, consequências e necessidade de uma Governança Ambiental Global. *Revista Científica do Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável da UNDB*. 1 (4). http://sou.undb.edu.br/public/publicacoes/artigo_acidifica%C3%83%C2%A7%C3%83%C2%A3o_dos_oceanos_-_camilla_fernanda_lima_sodr%C3%83%C2%A9.pdf.

Tanure, T. M. do P., 2020. Mudanças climáticas e agricultura no Brasil: impactos econômicos regionais e por cultivo familiar e patronal. 257f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional da Faculdade de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/33870>. Acesso em: 13 maio 2025.

Távora, F. L.; França, F. F.; Lima, J. R. P. de A., 2022. Impactos das Mudanças Climáticas na Agropecuária Brasileira, Riscos Políticos, Econômicos e Sociais e os Desafios para a Segurança Alimentar e Humana. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, (Texto para Discussão nº313). pp. 24-26. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td313>. Acesso em: 13 maio 2025.

Todde, G. *et al.*, 2018. Comprehensive Energy Analysis and Related Carbon Footprint of Dairy Farms, Part 1: Direct Energy Requirements. *Energies*. 11 (2). <https://doi.org/10.3390/en11020451>.

Tongwane, M. I. & Moeletsi, M. E., 2021. Provincial cattle carbon emissions from enteric fermentation and manure management in South Africa. *Environmental Research*. 195. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110833>.

United Nations (UN), Department of Economic and Social Affairs, Population Division (UNDESA), 2019. World Population Prospects 2019: Highlights. New York: United Nations. Disponível em: https://population.un.org/wpp/assets/Files/WPP2019_Highlights.pdf. Acesso em: 29 nov. 2024.

U. S. Environmental Protection Agency (EPA), Climate Change Division, Office of Atmospheric Programs, 2009. Technical support document for manure management systems: proposed rule for mandatory reporting of greenhouse gases. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/tsd_manure_020409.pdf. Acesso em: 21 jun. 2025.

United States Environmental Protection Agency (EPA), 2009. Frequently Asked Questions About Global Warming and Climate Change: Back to Basics. Disponível em: https://archive.epa.gov/epa/production/files/2016-07/documents/climate_basics.pdf. Acesso em: 22 nov. 2024.

van Gastelen, S. *et al.*, 2017. Relationships between methane emission of Holstein Friesian dairy cows and fatty acids, volatile metabolites and non-volatile metabolites in milk. *Animal*. 11 (9), 1539-1548. <https://doi.org/10.1017/S1751731117000295>.

van Gastelen, S. *et al.*, 2018. Predicting enteric methane emission of dairy cows with milk Fourier-transform infrared spectra and gas chromatography-based milk fatty acid profiles. *Journal of Dairy Science*. 101 (6), 5582-5598. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13052>.

Vellinga, T. V.; Gerber, P. J.; Opio, C., 2010. Greenhouse gas emissions from global dairy production: A Life Cycle Assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Animal Production and Health Division. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118489451.ch2>. Acesso em: 06 jun. 2025.

Vetter, S. H. *et al.*, 2018. The potential to reduce GHG emissions in egg production using a GHG calculator – A Cool Farm Tool case study. *Journal of Cleaner Production*. 202, 1068-1076. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.199>.

Vidican, R. *et al.*, 2022. Assessment of greenhouse gas emissions from dairy farming using The Cool Farm Tool. *Journal of Applied Life Sciences and Environment*. 55 (3), 323-333. <https://doi.org/10.46909/alae-552067>.

Villanueva, C. *et al.*, 2023. Contribución de la cobertura arbórea a la compensación de las emisiones de gases de efecto invernadero de fincas productoras de leche em el sur oriente de Guatemala. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*. 31 (11), 93-102. <https://doi.org/10.53588/alpa.310105>.

Vilela, D. *et al.*, 2017. A evolução do leite no Brasil em cinco décadas. *Revista De Política Agrícola*. 26 (1), 5-24. <https://rpa.sede.embrapa.br/RPA/article/view/1243>.

Wecking, A. R. *et al.*, 2020. Reconciling annual nitrous oxide emissions of an intensively grazed dairy pasture determined by eddy covariance and emission factors. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 287. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106646>.

Wightman, J. L. & Woodbury, P. B., 2016. New York Dairy Manure Management Greenhouse Gas Emissions and Mitigation Costs (1992-2022). *Journal of Environmental Quality*. 45 (1), 266-275. <https://doi.org/10.2134/jeq2014.06.0269>.

Wilkes, A. *et al.*, 2020. Variation in the carbon footprint of milk production on smallholder dairy farms in central Kenya. *Journal of Cleaner Production*. 265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121780>.

Williams, S.R.O. *et al.*, 2014. Selecting Cows for Low Enteric Methane Emissions May Affect Milk Composition. *In: Australasian Dairy Science Symposium, 2014, Hamilton, New Zealand. Proceedings [...]. Hamilton, New Zealand. p. 151-153. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/271507244_Selecting_cows_for_low_enteric_methane_emissions_may_affect_milk_composition. Acesso em: 07 jun. 2024.*

Witkowska, D. *et al.*, 2020. The effect of dairy cattle housing systems on the concentrations and emissions of gaseous mixtures in barns determined by Fourier-Transform Infrared Spectroscopy. *Annals of Animal Science*. 20 (4), 1487-1507. <https://doi.org/10.2478/aoas-2020-0039>.

World Health Organization (WHO), 2010. What is the greenhouse effect and why should I be able to explain it to others?. Heat Waves, floods and the health impacts of climate change: A Prototype Training Workshop for City Officials. https://extranet.who.int/kobe_centre/sites/default/files/pdf/2010datasheets.pdf.

Wróbel-Jedrzejska, M. *et al.*, 2025. Carbon Footprint of Milk Processing – Case Study of Polish Dairy. *Agriculture*. 15 (1). <https://doi.org/10.3390/agriculture15010062>.

Xavier, C. V., 2017. Sucessão e rotação de culturas em sistema de semeadura direta: implicações na emissão de CO₂ e atributos do solo. 2018. 91 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/180832>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Zhou, A. & Yuan, C., 2024. Global warming intensifies once-in-a-decade extreme precipitation in summer in China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*. 18 (4), 100561. <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2024.100561>.

ANEXO

Anexo Único – Tipos de manejos de dejetos e suas especificações.

Tipo de manejo	Descrição
Armazenamento Sólido	O esterco é armazenado por um período em pilhas não confinadas, para posteriormente ser empregado como fertilizante.
Biodigestor Anaeróbico	De baixo vazamento de gás, alta tecnologia industrial, armazenamento hermético de baixa qualidade; De alto vazamento de gás, baixa tecnologia, armazenamento hermético de alta qualidade.
Compostagem em leiras	Revolvimento intensivo: revolvimento periódico para mistura e aeração; Revolvimento ocasional: revolvimento intermitente do material para mistura e aeração.
Curral Seco	Área de confinamento dos animais, em que o esterco é acumulado ao longo do tempo, com remoções periódicas do material.
Distribuição Diária	Prática de coletar diariamente os dejetos da instalação em que os animais permanecem, utilizando na cultura vegetal.
Lagoa Anaeróbica Descoberta	Sistemas de armazenamento, estabilização e reutilização do esterco líquido
Tratamento Aeróbico (aeração natural)	Tratamento biológico em que o material é submetido à aeração para que haja decomposição do material orgânico pelos microrganismos.

Fonte: EPA, 2009; Campos *et al.*, 2012; Palhares, 2021; Pinheiro *et al.*, 2023.