



KELTHON PATRICK SANTOS MAGALHÃES

**TÉCNICAS NUTRICIONAIS E DE MANEJO PARA
AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO E REDUZIR AS
EMISSÕES DE METANO NA PECUÁRIA: UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA**

**LAVRAS – MG
2026**

KELTHON PATRICK SANTOS MAGALHÃES

**TÉCNICAS NUTRICIONAIS E DE MANEJO PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA
DE PRODUÇÃO E REDUZIR AS EMISSÕES DE METANO NA PECUÁRIA: UMA
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

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

Prof. Dr. Erick Darlisson Batista
Orientador

**LAVRAS – MG
2026**

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

Magalhães, Kelthon Patrick Santos.

Técnicas nutricionais e de manejo para aumentar a eficiência de produção e
reduzir as emissões de metano na pecuária : Uma revisão bibliográfica / Kelthon
Patrick Santos Magalhães. - 2026.

52 p. : il.

Orientador: Erick Darlisson Batista

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. Bovinocultura. 2. Gases de efeito estufa. 3. Eficiência alimentar. I. Darlisson
Batista, Erick. II. Universidade Federal de Lavras. III. Título.

KELTHON PATRICK SANTOS MAGALHÃES

**TÉCNICAS NUTRICIONAIS E DE MANEJO PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA
DE PRODUÇÃO E REDUZIR AS EMISSÕES DE METANO NA PECUÁRIA: UMA
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

**NUTRITIONAL AND MANAGEMENT STRATEGIES TO IMPROVE
PRODUCTION EFFICIENCY AND REDUCE METHANE EMISSIONS IN
LIVESTOCK: A BIBLIOGRAPHIC REVIEW**

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

APROVADO em 31 de março de 2026.
Dr^a Priscilla Dutra Teixeira UFMS
Dr^o Leandro Samia Lopes UFLA

Documento assinado digitalmente
 **ERICK DARLISSON BATISTA**
Data: 05/05/2026 11:10:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Erick Darlison Batista
Orientador

**LAVRAS – MG
2026**

Aos meus pais, meus irmãos, minha sobrinha, em memória da minha vovó

A todos que torceram por mim

Dedico

AGRADECIMENTOS

Chegar até aqui foi uma jornada desafiadora, mas também repleta de aprendizado, superação e gratidão. Em primeiro lugar, gostaria de expressar minha imensa gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Erick Darlisson Batista, pelo constante apoio, orientação e incentivo ao longo de todo o desenvolvimento deste projeto. Seu conhecimento, paciência e dedicação foram essenciais para que eu pudesse evoluir e amadurecer acadêmica e pessoalmente. Minha gratidão se estende a todos os professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Produção Animal da Universidade Federal de Lavras, que, com seu conhecimento e experiências, enriqueceram minha trajetória acadêmica. O ambiente colaborativo e a troca de ideias com todos vocês contribuíram muito para o desenvolvimento deste trabalho. Gostaria de agradecer também ao Projeto Rural Sustentável, que foi essencial para a execução de parte das atividades práticas deste trabalho. O apoio e a infraestrutura fornecidos por este projeto permitiram que os objetivos fossem alcançados de forma eficiente e com a qualidade que o tema exigia. A parceria foi de grande importância, tanto para o sucesso desta pesquisa quanto para o meu crescimento acadêmico e profissional. À Universidade Federal de Lavras, sou imensamente grato pela oportunidade de estudar em uma instituição que preza pela qualidade e excelência acadêmica, e pela infraestrutura oferecida para o desenvolvimento de pesquisas de ponta. Não poderia deixar de agradecer à minha família, que sempre foi meu alicerce, meu maior apoio. Aos meus pais, por acreditarem em meu potencial e me apoiarem em todos os momentos, seja nas alegrias ou nas dificuldades. Sua dedicação e amor incondicional foram fundamentais para que eu pudesse seguir em frente. Aos meus irmãos e meu namorado pelo companheirismo e pelas palavras de motivação que sempre me deram forças. Aos meus amigos, que sempre me incentivaram a seguir com o mestrado e me ajudaram a superar os momentos mais difíceis, sou eternamente grato pela amizade e pelo apoio. Vocês tornaram minha jornada mais leve e divertida. Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso deste trabalho. Cada um de vocês deixou sua marca e foi fundamental para que eu chegasse a este momento. Este trabalho é o resultado de uma grande colaboração e esforço conjunto, e é com muita gratidão que o apresento. Agradeço ao Projeto Rural Sustentável, à Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Produção Animal pela oportunidade e apoio essenciais para a realização deste trabalho.

RESUMO

O aumento da população mundial exige crescimento da produção de alimentos de origem animal, tornando a bovinocultura brasileira estratégica para a economia global. Entretanto, sua expansão está associada à emissão significativa de gases de efeito estufa (GEE), especialmente metano (CH_4), resultante da fermentação entérica e da decomposição de dejetos. O CH_4 possui alto potencial de aquecimento global e representa perdas energéticas, impactando a eficiência alimentar e o desempenho produtivo. Grande parte da pecuária nacional baseia-se em sistemas extensivos, predominantemente em pastagens de *Brachiaria*, cuja qualidade nutricional variável contribui para maior emissão de metano por unidade de produto. Estratégias nutricionais e de manejo são fundamentais para reduzir as emissões. A suplementação com ingredientes de maior valor energético, lipídeos, taninos e ionóforos, bem como o ajuste da proporção de carboidratos fermentáveis, modulam a microbiota ruminal e favorecem vias de fermentação menos metanogênicas, reduzindo a emissão de CH_4 . Além disso, o manejo de pastagens, introdução de leguminosas com metabólitos secundários e melhoria dos índices zootécnicos, incluindo seleção genética de animais mais eficientes, promovem redução das emissões por unidade de produto, conciliando produtividade e sustentabilidade. Sistemas integrados, como integração lavoura-pecuária e silvipastoris, potencializam a mitigação de GEE ao elevar a eficiência produtiva e contribuir para o sequestro de carbono. Portanto, este estudo analisa a contribuição da bovinocultura para o aquecimento global, com foco na mitigação do metano, avaliando estratégias nutricionais, genéticas e de manejo que reduzam a intensidade de emissões sem comprometer o desempenho animal, promovendo sistemas produtivos sustentáveis e ambientalmente responsáveis.

Palavras-chave: bovinocultura; gases de efeito estufa; eficiência alimentar.

ABSTRACT

The increase in the global population requires growth in the production of food of animal origin, making Brazilian cattle production strategic for the global economy. However, its expansion is associated with significant emissions of greenhouse gases (GHG), especially methane (CH₄), resulting from enteric fermentation and the decomposition of manure. CH₄ has a high global warming potential and represents energy losses, impacting feed efficiency and productive performance. A large portion of national livestock production is based on extensive systems, predominantly on *Brachiaria* pastures, whose variable nutritional quality contributes to higher methane emissions per unit of product. Nutritional and management strategies are essential to reduce emissions. Supplementation with higher-energy ingredients, lipids, tannins, and ionophores, as well as adjustments in the proportion of fermentable carbohydrates, modulate the ruminal microbiota and favor less methanogenic fermentation pathways, reducing CH₄ emissions. In addition, pasture management, the introduction of legumes with secondary metabolites, and improvements in zootechnical indices, including the genetic selection of more efficient animals, promote reductions in emissions per unit of product, reconciling productivity and sustainability. Integrated systems, such as crop-livestock integration and silvopastoral systems, enhance GHG mitigation by increasing productive efficiency and contributing to carbon sequestration. Therefore, this study analyzes the contribution of cattle production to global warming, focusing on methane mitigation, by evaluating nutritional, genetic, and management strategies that reduce emission intensity without compromising animal performance, promoting sustainable and environmentally responsible production systems.

Keywords: Cattle farming; greenhouse gases; feed efficiency

INDICADORES DE IMPACTO

A pesquisa contribui significativamente para a compreensão e mitigação das emissões de metano na bovinocultura, promovendo impactos sociais, tecnológicos, econômicos e ambientais concretos e em potencial. Os impactos sociais incluem o potencial de melhoria na capacitação de produtores rurais, técnicos e estudantes, estimulando a adoção de práticas de manejo e suplementação nutricional mais eficientes e sustentáveis, promovendo integração entre o setor acadêmico e a sociedade. No âmbito tecnológico, o trabalho apresenta estratégias nutricionais e de manejo — como suplementação com lipídeos, taninos, ionóforos, ajuste de carboidratos fermentáveis, manejo de pastagens, introdução de leguminosas e sistemas integrados de produção — que modulam a microbiota ruminal e reduzem a intensidade de emissões de metano sem comprometer o desempenho animal, fornecendo subsídios científicos para a inovação e melhoria da eficiência produtiva. Economicamente, a implementação dessas estratégias tem potencial de reduzir perdas energéticas e aumentar a eficiência alimentar por unidade de produto, favorecendo a rentabilidade das propriedades rurais. Ambientalmente, a pesquisa contribui para a redução da emissão de CH₄ na bovinocultura e para a sustentabilidade dos sistemas produtivos, evidenciando alinhamento com as demandas globais de mitigação das mudanças climáticas. Culturalmente, o estudo promove conscientização sobre a importância de práticas produtivas ambientalmente responsáveis, ampliando o entendimento sobre os efeitos da pecuária no aquecimento global. Os territórios impactados compreendem áreas de produção bovina nacional, considerando populações diretamente envolvidas nos sistemas de produção extensiva e intensiva, incluindo produtores, técnicos e estudantes. Os resultados se enquadram nas áreas temáticas de Meio Ambiente, Educação e Tecnologia e Produção da Política Nacional de Extensão e estão alinhados a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, demonstrando relevância científica, prática e potencial de aplicação social e ambiental.

IMPACT INDICATORS

The research significantly contributes to the understanding and mitigation of methane emissions in cattle farming, generating both tangible and potential social, technological, economic, and environmental impacts. Social impacts include the potential for enhanced training of rural producers, technicians, and students, encouraging the adoption of more efficient and sustainable management and nutritional supplementation practices, thereby fostering integration between the academic sector and society. From a technological perspective, the study presents nutritional and management strategies—such as supplementation with lipids, tannins, ionophores, adjustment of fermentable carbohydrate proportions, pasture management, introduction of legumes, and integrated production systems—that modulate ruminal microbiota and reduce methane emission intensity without compromising animal performance, providing scientific support for innovation and improvements in productive efficiency. Economically, the implementation of these strategies has the potential to reduce energy losses and increase feed efficiency per unit of product, thereby enhancing the profitability of livestock farms. Environmentally, the research contributes to the reduction of CH₄ emissions in cattle farming and promotes the sustainability of production systems, demonstrating alignment with global demands for climate change mitigation. Culturally, the study raises awareness regarding the importance of environmentally responsible production practices, expanding understanding of the livestock sector's impact on global warming. The impacted territories include national cattle production areas, encompassing populations directly involved in both extensive and intensive production systems, including producers, technicians, and students. The results align with the thematic areas of Environment, Education, and Technology and Production of the National Extension Policy and correspond to several of the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), demonstrating scientific relevance, practical applicability, and potential for social and environmental impact.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 4.1- Fluxograma do processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos.....	30
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1- Resumo dos artigos com valores anuais reportados (kg CH ₄ /animal/ano).....	32
Tabela 5.2- Perda de energia bruta (EB) convertida em metano (CH ₄) em diferentes sistemas e dietas de bovinos.....	33
Tabela 5.3- Estratégias de mitigação de metano em bovinos agrupadas por tipo de intervenção	34
Tabela 5.4- Comparação de indicadores de emissão entérica de metano em diferentes sistemas de produção de bovinos.....	40

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL:	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	17
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	18
3.1 PRODUÇÃO DO METANO ENTÉRICO.....	18
3.2. MÉTODOS DE MENSURAÇÃO E MÉTRICAS DE EMISSÃO	20
3.3. ESTRATÉGIAS PARA MITIGAÇÃO DE CH ₄	22
3.3.2. COMPOSTOS FUNCIONAIS: GORDURA VEGETAL, TANINOS E IONÓFOROS.	24
3.3.3. MANEJO DE PASTAGENS E MELHORIA DOS ÍNDICES ZOOTÉCNICOS.....	26
4. METODOLOGIA	28
4.1. ESTRATÉGIA DE BUSCA	28
4.2. CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO	28
4.3. SELEÇÃO DOS ESTUDOS	29
4.4. ANÁLISE DOS DADOS	29
4.5. LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	30
5. DISCUSSÃO	30
6. CONCLUSÃO	44
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

A pecuária brasileira ocupa posição de destaque mundial, tanto pelo volume de produção quanto pela relevância econômica e social que representa. Contudo, o setor enfrenta o desafio de conciliar o aumento da produtividade com a redução dos impactos ambientais, especialmente no que se refere à emissão de gases de efeito estufa (GEE). Entre esses gases, o metano (CH_4) se destaca devido ao seu alto potencial de aquecimento global e à expressiva contribuição da fermentação entérica dos ruminantes para as emissões totais. Essa condição coloca o setor diante da necessidade de adotar estratégias que aumentem a eficiência produtiva e reduzam as emissões por unidade de produto, sem comprometer a sustentabilidade econômica da atividade (BAHIA, 2024; BUENO; ISSAKOWICZ, 2024).

A emissão de metano entérico é um processo inerente ao sistema digestivo dos ruminantes, resultante da fermentação microbiana no rúmen. Durante esse processo digestivo, parte da energia bruta ingerida é perdida sob a forma de gás metano, o que representa uma ineficiência metabólica que pode variar de 2% a 12% da energia consumida (Berchielli et al., 2012). Essa perda energética está diretamente associada à degradação dos carboidratos e à atividade das Archaeas metanogênicas, que utilizam o hidrogênio liberado na fermentação para formar o CH_4 . Portanto, o CH_4 assume duplo papel na pecuária: indicador de ineficiência produtiva e importante contribuinte para as emissões de gases de efeito estufa (GUAN et al., 2006).

O Brasil, por suas condições tropicais e pela dimensão de seu rebanho, tem adotado ações de soluções sustentáveis para a pecuária. A adoção de tecnologias de manejo, nutrição e genética que favoreçam a eficiência no uso dos recursos tem se mostrado essencial para compatibilizar produtividade e sustentabilidade. Nesse sentido, compreender os mecanismos que regulam a produção de metano, bem como as interações entre dieta, manejo e ambiente, é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de mitigação efetivas e aplicáveis em larga escala (DE ASSIS PIRES et al., 2021; GENRO et al., 2023).

A fermentação ruminal é um processo complexo, influenciado por diversos fatores, como composição da dieta, nível de fibra e digestibilidade da forragem. Forragens de melhor qualidade e de maior digestibilidade tendem a favorecer a rota propionogênica, reduzindo o hidrogênio disponível para arqueias metanogênicas (BERCHIELLI et al., 2012; LIMA, 2007). Nesse contexto, a melhoria da qualidade da alimentação e o uso de aditivos naturais e sintéticos têm sido amplamente estudados como medidas de mitigação, uma vez que alteram a microbiota ruminal e reduzem a produção de CH_4 por unidade de alimento ingerido (ARAÚJO et al., 2021; VIEIRA et al., 2021).

Técnicas *in vivo*, como as câmaras respirométricas e o uso do traçador hexafluoreto de enxofre (SF₆), são amplamente utilizadas para medir as emissões de metano. Métodos alternativos, como sistemas automatizados de mensuração em campo, podem utilizar o CO₂ como referência metabólica em modelos indiretos de estimativa da emissão de CH₄, mas dependem de pressupostos e calibração, não substituindo métodos diretos (MADSEN et al., 2010). Nesse sentido, a padronização dos métodos é importante para garantir a reprodutibilidade dos resultados e permitir a comparação entre diferentes raças, dietas e condições ambientais (MACHADO et al., 2011).

O aprimoramento dos métodos de mensuração também tem contribuído para identificar diferenças nas emissões entre raças e tipos genéticos. Estudos conduzidos por Duthie et al. (2017) mostraram que a raça, isoladamente, não apresenta efeito expressivo sobre o rendimento de CH₄ (CH₄ por unidade de consumo, kg de MS); entretanto, quando os valores são ajustados para a intensidade das emissões (CH₄ por unidade de produto), observa-se que animais de maior eficiência alimentar e melhor conversão energética emitem proporcionalmente menos metano. Esses resultados reforçam que a avaliação das emissões deve considerar indicadores relativos à produtividade, e não apenas valores absolutos.

Paralelamente, o entendimento da relação entre eficiência produtiva e intensidade de emissões vem se consolidando como elemento central na pecuária de baixo metano. Estudos demonstram que animais mais eficientes, com maior ganho por unidade de alimento ingerido, tendem a emitir menos metano por unidade de produto, mesmo que a emissão absoluta não se altere significativamente (DUTHIE et al., 2017). Isso reforça a importância de avaliar as emissões de forma relativa, considerando indicadores como CH₄ por quilo de leite ou carne produzida, em vez de valores absolutos por animal (g por dia), pois essa métrica reflete melhor o desempenho ambiental dos sistemas pecuários (GENRO et al., 2023).

No contexto brasileiro, a intensificação sustentável e o melhor manejo das pastagens têm se mostrado essenciais para reduzir emissões sem comprometer a produtividade. Sistemas integrados de produção, como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), têm promovido resultados consistentes de mitigação, elevando a eficiência de uso de energia e contribuindo para o sequestro de carbono no solo (DE ASSIS PIRES et al., 2021; FLORES-COELLO et al., 2023). Além disso, práticas como o pastejo rotacionado e o uso de forrageiras de alta digestibilidade reduzem a intensidade de emissão e melhoram o balanço de carbono em propriedades tropicais.

As estratégias nutricionais também desempenham papel importante no controle das emissões entéricas. A inclusão de compostos como lipídios vegetais, taninos condensados e

subprodutos de destilarias tem demonstrado potencial para reduzir a produção de CH₄ sem prejudicar o desempenho animal (CARVALHO et al., 2016; ARAÚJO et al., 2021; MAGNANI et al., 2023). No entanto, a literatura ressalta que a eficácia dessas medidas depende da composição da dieta e do equilíbrio entre fibra e carboidratos fermentáveis, sendo necessária cautela para evitar impactos negativos sobre a digestibilidade e o metabolismo ruminal (BERCHIELLI et al., 2012; FONSECA et al., 2023).

Mais recentemente, o melhoramento genético tem sido apontado como uma estratégia relevante para a mitigação de longo prazo. Estudos como os de Zhang et al. (2019), Løvendahl et al. (2022) e Ferraz et al. (2024) indicam a existência de variabilidade genética para características associadas à emissão de metano e à eficiência alimentar, tanto em raças taurinas quanto zebuínas. Nesse contexto, Zhang et al. (2019) avaliaram, por meio de modelos de predição, os efeitos de índices de seleção em bovinos leiteiros sobre as emissões de metano, considerando a inclusão desse critério no contexto do melhoramento genético.

A genética aplicada à eficiência produtiva representa uma oportunidade para alinhar o progresso zootécnico com a mitigação ambiental. Estudos demonstram que a seleção de animais mais eficientes, com menor consumo residual e melhor eficiência alimentar, pode reduzir as emissões por unidade de produto, além de melhorar o aproveitamento energético da dieta (LØVENDAHL et al., 2022; ZHANG et al., 2019). Essa abordagem favorece o avanço genético sustentável, possibilitando ganhos permanentes e cumulativos em termos de menor intensidade de emissão (FERRAZ et al., 2024).

Embora a seleção genética apresente potencial significativo, os resultados dependem da padronização dos métodos de mensuração e definição dos traços genéticos. A falta de uniformidade entre protocolos e indicadores, como emissões absolutas, intensidade e metano residual, pode limitar a comparação entre populações e reduzir a acurácia das estimativas genéticas (Zhang et al., 2019; LØVENDAHL et al., 2022). Dessa forma, a integração entre medições fenotípicas consistentes e índices de seleção equilibrados é essencial para garantir resultados sólidos e comparáveis.

Em conjunto, o progresso na mensuração, nutrição, manejo e genética aponta para uma pecuária de ciclo fechado, capaz de equilibrar eficiência produtiva e mitigação ambiental. A combinação dessas estratégias cria um sistema sinérgico, em que o aumento da produtividade não resulta necessariamente em maior emissão de GEE. No contexto brasileiro, onde o clima, o manejo e as condições de pastagem são distintos de regiões temperadas, a consolidação de práticas integradas de mitigação é determinante para assegurar sustentabilidade e

competitividade internacional (DE ASSIS PIRES et al., 2021; GENRO et al., 2023; FLORES-COELLO et al., 2023).

Compreender a interação entre dieta, manejo, microbiota e genética é essencial para o desenvolvimento de sistemas pecuários sustentáveis (DE ASSIS PIRES et al., 2021). As evidências indicam que a mitigação eficaz do metano entérico requer ações integradas e adaptadas às condições produtivas de cada região. O aprimoramento de práticas de manejo e de programas genéticos voltados à eficiência alimentar representa passo decisivo para consolidar uma pecuária de baixa emissão e ambientalmente responsável (Genro et al., 2023).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL:

Analisar a contribuição dos ruminantes, especialmente na bovinocultura de corte e leite, para a emissão de gases de efeito estufa, com ênfase no metano entérico (CH_4), e identificar estratégias nutricionais, tecnológicas e de manejo que contribuam para a mitigação dessas emissões, visando uma produção pecuária mais sustentável e eficiente.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Compreender os mecanismos de produção de metano entérico no rúmen, com ênfase no balanço de hidrogênio e nas rotas fermentativas.
- Avaliar a influência da dieta e da qualidade da forragem na fermentação ruminal e na produção de CH_4 , especialmente em sistemas baseados em pastagens tropicais.
- Analisar os efeitos de estratégias nutricionais e da suplementação sobre a eficiência de utilização da energia e a emissão de metano.
- Examinar o papel do manejo de pastagens e da intensificação produtiva na redução da intensidade de emissão (CH_4 por unidade de produto).
- Discutir a mitigação do metano como resultado do aumento da eficiência produtiva, integrando nutrição, manejo e genética.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 PRODUÇÃO DO METANO ENTÉRICO

O efeito estufa é um fenômeno natural e indispensável para a manutenção da temperatura do planeta. Em termos simples, a radiação solar atravessa a atmosfera, aquece a superfície terrestre e parte desse calor é reemitido para a atmosfera. Nesse processo, certos gases retêm energia e intensificam o aquecimento, destacando-se o metano (CH_4), o dióxido de carbono (CO_2), o óxido nitroso (N_2O) e os gases fluorados, entre outros, o que contribui para o aumento do aquecimento global (BUENO e ISSAKOWICZ, 2024; DIAS et al., 2017).

No contexto agropecuário, a bovinocultura, especialmente a brasileira, tem sido cada vez mais avaliada sob a ótica das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Essa análise, contudo, nem sempre é favorável ao setor. Os baixos índices zootécnicos observados em sistemas baseados em pastagens degradadas e com oferta nutricional limitada resultam em menor eficiência produtiva e maior emissão de metano por quilograma de carne e/ou leite produzido (PEREIRA et al., 2015; MANZATTO et al., 2020).

De acordo com Oliveira et al. (2017), sistemas de pastagens degradadas no Brasil apresentam emissões de metano estimadas em aproximadamente 25.227 kg CH_4 /ano, enquanto em sistemas intensivos e bem manejados esse valor se reduz para cerca de 16.685 kg CH_4 /ano. Essa diferença demonstra a influência direta da qualidade do pasto e da eficiência do manejo sobre o balanço de emissões, evidenciando o potencial das práticas sustentáveis de manejo para a mitigação dos gases de efeito estufa.

A emissão global de metano proveniente da pecuária é estimada entre 90 e 120 Tg CH_4 por ano, correspondendo a cerca de 25 a 30% das emissões antrópicas desse gás. Em escala global, as emissões totais situam-se entre 575 e 669 Tg CH_4 por ano, sendo o setor agrícola responsável por aproximadamente 40% das emissões antrópicas. No Brasil, o setor agropecuário configura-se como a principal fonte de metano, sendo responsável por 75,6% das emissões nacionais em 2023, o que corresponde a aproximadamente 15,7 Mt CH_4 . Desse total, 92,2% são provenientes da fermentação entérica, equivalente a cerca de 14,5 Mt CH_4 , evidenciando o papel predominante dos ruminantes na dinâmica das emissões nacionais (OBSERVATÓRIO DO CLIMA; SEEG, 2025).

Dentro desse contexto, a bovinocultura de corte foi responsável pela maior parcela das emissões, com 12,7 Mt CH_4 , equivalente a 87,7% do total proveniente da fermentação entérica, enquanto a bovinocultura de leite contribuiu com 1,4 Mt CH_4 , correspondendo a 9,4% desse total. Esses resultados evidenciam o papel predominante da pecuária, especialmente da

produção de corte, na dinâmica das emissões nacionais de metano (OBSERVATÓRIO DO CLIMA; SEEG, 2025). Nesse sentido, tais evidências reforçam, em uma perspectiva mais ampla, a relevância do setor pecuário no balanço global de emissões e a necessidade de estratégias que limitem a liberação desse gás, conforme discutido por Berchielli et al. (2012).

Do ponto de vista fisiológico, a metanogênese integra o processo digestivo normal de ruminantes. No rúmen, a fermentação anaeróbia dos alimentos converte carboidratos em ácidos graxos de cadeia curta (acetato, propionato e butirato), que servem como fonte energética para o animal. Paralelamente, forma-se uma mistura gasosa com CO_2 e CH_4 , resultante da atividade de arqueias metanogênicas que utilizam H_2 para reduzir CO_2 e gerar metano. Esses gases são eliminados principalmente por eructação e representam perdas energéticas do sistema, razão pela qual a sua otimização é estratégica (LIMA, 2007; STELLA et al., 2020; BUENO e ISSAKOWICZ, 2024).

Do ponto de vista zootécnico, a contribuição do metano decorre do balanço entre energia bruta ingerida, rotas fermentativas e remoção de H_2 no rúmen: a formação de acetato e butirato libera H_2 , enquanto a formação de propionato o consome, modulando a fração de energia perdida como CH_4 (Y_m). Por isso, qualidade da dieta, taxa de passagem e pH são determinantes do potencial metanogênico (BUENO & ISSAKOWICZ, 2024; STELLA et al., 2020; MACHADO et al., 2013).

Além das emissões entéricas, há contribuição, ainda que mais limitada no tempo, das fezes após a excreção. Microrganismos metanogênicos presentes no material fecal podem utilizar substratos residuais e produzir CH_4 ; contudo, essa produção tende a declinar rapidamente à medida que a umidade das fezes diminui, restringindo a duração do processo (SOUSA et al., 2022; RUGGIERI; CARDOSO, 2017).

Sob a ótica microbiológica, o rúmen funciona como verdadeira câmara fermentativa. O alimento ingerido é degradado por uma população microbiana numerosa e diversa, cuja fermentação libera H_2 , posteriormente utilizado por arqueias metanogênicas do filo Archaea. Entre os grupos com maior impacto na produção de metano entérico, destacam-se gêneros como *Methanobrevibacter*, *Methanobacterium*, *Methanomicrobium* e *Methanosarcina*, conforme demonstrado em diferentes estudos (BUENO e ISSAKOWICZ, 2024; MACHADO et al., 2011).

Neste cenário, o H_2 constitui elemento importante para o equilíbrio redox do ambiente ruminal. A adequada degradação de nutrientes e a manutenção da produção de ácidos graxos de cadeia curta dependem do balanço de H_2 , uma vez que sua remoção favorece a reoxidação do NADH e a continuidade da fermentação. Em condições normais, a metanogênese cumpre

esse papel de “sumidouro” de H_2 , estabilizando o processo fermentativo (PEREIRA et al., 2015).

Do ponto de vista metabólico, a própria formação dos ácidos graxos altera a disponibilidade de H_2 . A produção de acetato e butirato, típica da fermentação de carboidratos fibrosos no rúmen, tende a gerar H_2 ; em contrapartida, a formação de propionato o consome. Assim, a via propionogênica compete diretamente com a metanogênese, pois reduz o substrato disponível para a redução do CO_2 a CH_4 . Em outras palavras, quanto maior a rota para propionato, menor o potencial metanogênico do sistema (VIEIRA, 2021; BAHIA, 2024).

Dessa lógica decorrem estratégias nutricionais recorrentes: como a produção de acetato libera mais H_2 do que a de propionato, busca-se, quando pertinente, modular a fermentação para reduzir a geração de acetato e favorecer a de propionato, diminuindo, por consequência, a formação de metano. Em síntese, o balanço de H_2 no rúmen — ditado pelo perfil fermentativo entre acetato e propionato — determina, em grande medida, o volume de CH_4 produzido (des).

Por fim, o pH e a composição da dieta modulam a ecologia microbiana e, conseqüentemente, as emissões de CH_4 . Em ambientes mais ácidos, característicos de dietas ricas em carboidratos não fibrosos, há redução relativa de bactérias Gram-positivas e de protozoários, com menor produção de acetato e butirato e, portanto, menor disponibilidade de H_2 para a metanogênese. Em contrapartida, bactérias Gram-negativas, em geral amilolíticas, tendem a se beneficiar, direcionando mais H_2 para a via propionogênica e associando-se a emissões mais baixas. Já dietas baseadas em pastagens favorecem bactérias celulolíticas, especializadas na degradação da parede celular vegetal e produtoras predominantes de acetato, butirato e CO_2 , perfil que, por sua própria natureza fermentativa, está ligado a maiores fluxos de H_2 e, por consequência, a maior potencial de produção de metano (STELLA et al., 2020; DIAS et al., 2017).

3.2. MÉTODOS DE MENSURAÇÃO E MÉTRICAS DE EMISSÃO

As emissões de metano entérico podem ser determinadas por metodologias *in vitro* e *in vivo*, cada uma com vantagens e limitações específicas. As técnicas *in vitro* são utilizadas principalmente em testes iniciais de avaliação de estratégias de mitigação, por apresentarem menor custo e permitirem resultados rápidos. Nesses ensaios, uma amostra de líquido ruminal é incubada sob condições controladas para simular a fermentação do rúmen, possibilitando medir a produção total de gases e estimar o volume de CH_4 gerado. Apesar da praticidade, esses métodos não reproduzem totalmente as condições fisiológicas do animal e, por isso, seus resultados devem ser interpretados com cautela (MACHADO et al., 2011).

Entre as metodologias *in vivo*, o método de referência é o uso de câmaras respirométricas, que quantificam o ên total de gases emitidos pelo animal em ambiente controlado, sendo considerada a técnica mais precisa, pois permite medições diretas de CH₄, CO₂ e O₂ com alta confiabilidade, mas apresenta custo elevado e pouca aplicabilidade em sistemas comerciais (MACHADO et al., 2011). Em função dessas limitações, outras abordagens vêm sendo aplicadas para medições em campo, com destaque para o gás traçador hexafluoreto de enxofre (SF₆). O método baseia-se na inserção de uma cápsula de permeação contendo o traçador no rúmen e na posterior coleta do ar expirado, permitindo estimar a produção de metano pela razão entre os gases coletados (PRIMAVESI et al., 2004; FROTA et al., 2017).

Outra alternativa é o uso do CO₂ como indicador interno em modelos indiretos de estimativa da emissão de CH₄. Nesse caso, a emissão é estimada a partir da produção conhecida ou calculada de dióxido de carbono, associando as concentrações de CH₄ e CO₂ nas amostras coletadas. Essa técnica apresenta menor custo e maior aplicabilidade em estudos com grande número de animais, embora dependa de calibração cuidadosa para garantir a precisão das estimativas (MACHADO et al., 2011). Estudos comparativos mostram que o método do SF₆ e o uso do CO₂ tendem a apresentar maior variabilidade entre animais e períodos de coleta quando comparados às câmaras respirométricas (BEAUCHEMIN et al., 2007). Além disso, diferenças de protocolo, tempo de medição e tipo de dieta explicam parte das variações relatadas entre estudos e regiões (XIE et al., 2025).

Outro ponto é a métrica usada. Emissão absoluta (g/dia; kg/animal/ano) e intensidade (por kg de leite ou de ganho) são indicadores diferentes. Genro et al. (2023) mostram que ganhos de eficiência podem reduzir a emissão por unidade de produto, mesmo quando a emissão absoluta do animal não cai. Bahia (2024) enfatiza que o tipo de sistema, a qualidade da forragem e a suplementação alteram essa relação. Em paralelo, Primavesi et al. (2004) lembram que vacas de alta ingestão podem ter emissão absoluta maior, mas, quando dividida pela produção, a intensidade pode ser semelhante ou menor.

A variabilidade observada nas emissões de metano entre diferentes sistemas produtivos também está diretamente relacionada às condições de manejo e nutrição, o que influencia a interpretação dos resultados obtidos pelos métodos de mensuração. Estudos conduzidos em sistemas intensificados indicam que melhorias na qualidade da forragem e no desempenho animal podem reduzir a emissão por unidade de produto (Meo-Filho et al., 2022). De forma semelhante, sistemas silvipastoris podem alterar as condições microclimáticas e o valor

nutritivo da dieta, impactando a produção de metano (Flores-Coello et al., 2023). Nesse sentido, fatores como produtividade e qualidade da dieta são determinantes para a intensidade de emissão, devendo ser considerados na comparação entre estudos (Genro et al., 2023; Bahia, 2024).

Além disso, variações no ambiente ruminal decorrentes da dieta também interferem nos resultados de mensuração. Revisões indicam que modificações na dieta, como a inclusão de lipídios ou alterações no perfil fermentativo, podem afetar a produção de metano ao modificar a disponibilidade de hidrogênio e a fermentação ruminal (BEAUCHEMIN et al., 2007). Da mesma forma, o uso de ionóforos pode alterar a produção de metano, com respostas que variam conforme a dieta, a dose e o tempo de uso (COOKE et al., 2024). Essas variações reforçam que os resultados obtidos por diferentes métodos de mensuração devem ser interpretados considerando as condições experimentais e nutricionais dos sistemas avaliados (Xie et al., 2025).

Mesmo quando os experimentos seguem protocolos semelhantes, as condições ambientais e o tipo de animal podem alterar significativamente os resultados. Frota et al. (2017) e Bahia (2024) destacam que condições ambientais e de manejo influenciam o consumo e a fermentação, afetando os valores estimados de CH₄. Além disso, Xie et al. (2025) observam que variações no tempo de coleta e no comportamento alimentar interferem na estimativa final. Por isso, comparar estudos de diferentes regiões ou categorias sem considerar esses fatores pode levar a interpretações distorcidas sobre a eficiência das estratégias de mitigação.

De forma geral, não existe um único método ou valor representativo para a mensuração do metano em bovinos. Cada técnica apresenta vantagens e limitações, e os resultados devem ser interpretados considerando o método utilizado, o protocolo experimental e as condições em que foram obtidos (PEREIRA, 2013; PRIMAVESI et al., 2004; BEAUCHEMIN et al., 2007; FROTA et al., 2017; GENRO et al., 2023; MEO-FILHO et al., 2022; FLORES-COELLO et al., 2023; XIE et al., 2025).

3.3. ESTRATÉGIAS PARA MITIGAÇÃO DE CH₄

A composição da dieta é um dos principais fatores que modulam a produção de metano. Dietas ricas em fibras, típicas de sistemas baseados em pastagens tropicais, favorecem microrganismos celulolíticos que produzem acetato e butirato, enquanto dietas com maior teor de carboidratos solúveis estimulam rotas propionogênicas que consomem H₂ e reduzem o potencial metanogênico (MACHADO et al., 2013; SIQUEIRA e CAVIGLIONI, 2021; BAHIA, 2024).

Os efeitos da dieta são multifacetados, envolvendo tanto o tipo de forragem quanto a qualidade nutricional e a oferta. Pastagens de alta digestibilidade reduzem a permanência do alimento no rúmen e aumentam a taxa de passagem, diminuindo o tempo de fermentação e, portanto, a produção de CH_4 . Já dietas com alta fração fibrosa aumentam a retenção ruminal e a produção de H_2 (BAHIA, 2024; FIGUEIREDO et al., 2023).

Diversas estratégias nutricionais têm sido testadas para redirecionar o metabolismo microbiano para vias menos metanogênicas. A suplementação com ingredientes de maior valor energético e o uso de aditivos que alteram a microbiota ruminal podem favorecer a produção de propionato e reduzir as emissões (RIVERA et al., 2010; BERCHIELLI et al., 2012; CRESPO et al., 2023; BAHIA, 2024).

Neste cenário, o uso de lipídeos tem se mostrado eficaz em reduzir as emissões de CH_4 . Isso ocorre porque os ácidos graxos insaturados podem exercer efeito tóxico sobre protozoários e bactérias celulolíticas, além de participarem do processo de biohidrogenação, que consome H_2 e reduz sua disponibilidade para arqueias metanogênicas. No entanto, níveis elevados de inclusão podem comprometer o consumo e a digestibilidade, sendo recomendada a limitação entre 6% e 7% da matéria seca da dieta (VALINOTE et al., 2005; BEAUCHEMIN et al., 2007; PEREIRA, 2013).

Os taninos, compostos fenólicos presentes em várias leguminosas, reduzem a emissão de metano por mecanismos múltiplos: diminuem a população de protozoários, reduzem a disponibilidade de H_2 e alteram o padrão de fermentação ruminal. Entretanto, seu uso deve ser criterioso, pois doses elevadas podem reduzir o consumo e a digestibilidade (PEREIRA, 2013; SIQUEIRA e CAVIGLIONI, 2021; BUENO e ISSAKOWICZ, 2024; BAHIA, 2024).

Outro grupo importante de aditivos são os ionóforos, como a monensina, a salinomicina e a lasalocida. Esses compostos antimicrobianos afetam seletivamente bactérias Gram-positivas e protozoários, redirecionando a fermentação para a produção de propionato e reduzindo o H_2 disponível para as arqueias metanogênicas. Além da redução de CH_4 , os ionóforos aumentam a eficiência alimentar e reduzem perdas energéticas (GONÇALVES et al., 2013; RANGEL et al., 2008; BUENO e ISSAKOWICZ, 2024).

Assim, a manipulação da dieta constitui uma das principais ferramentas de mitigação. Quando associada a práticas de manejo adequadas, pode reduzir significativamente a intensidade de emissões sem comprometer a produtividade (BERCHIELLI et al., 2012; CRESPO et al., 2023).

3.3.2. COMPOSTOS FUNCIONAIS: GORDURA VEGETAL, TANINOS E IONÓFOROS.

A manipulação da dieta desempenha um papel central na modulação da fermentação ruminal, influenciando diretamente a produção de CH₄ entérico. Nesse contexto, diversas estratégias — muitas ainda em fase de pesquisa — vêm sendo exploradas para mitigar as emissões (BERCHIELLI et al., 2012; BUENO e ISSAKOWICZ, 2024).

Entre elas, destaca-se o uso de aditivos alimentares como taninos, óleos essenciais, lipídeos saturados e insaturados, ionóforos, nitratos, leveduras e probióticos. Esses compostos, de diferentes origens, atuam modificando a microbiota ruminal e a dinâmica fermentativa, com o objetivo de reduzir a emissão de gases de efeito estufa sem comprometer a saúde ou o desempenho animal (FIGUEIREDO et al., 2023).

No caso dos lipídeos, a maior parte dos alimentos utilizados na nutrição animal contém proporções relevantes de ácidos graxos insaturados. Esses compostos podem exercer efeitos tóxicos sobre microrganismos ruminais, em especial bactérias Gram-positivas e protozoários. Além disso, tendem a se aderir às partículas alimentares, formando uma barreira física que dificulta a ação enzimática e microbiana (VALINOTE et al., 2005).

Para mitigar esses efeitos, ocorre no rúmen o processo de biohidrogenação, realizado pelos próprios microrganismos. Nesse mecanismo, os lipídeos esterificados são quebrados e, em seguida, hidrogenados, reduzindo a toxicidade e estabilizando o ambiente fermentativo (VALINOTE et al., 2005; BEAUCHEMIN et al., 2007).

A eficácia da adição de lipídeos para reduzir emissões de CH₄ depende de diversos fatores: o nível de suplementação, o tipo de lipídeo utilizado, a forma de fornecimento (como óleos orgânicos ou sementes oleaginosas) e as características da dieta. Embora reduções superiores a 40% possam ser observadas em condições experimentais, os valores mais comuns variam entre 10% e 25% (PALANGI et al., 2022).

Recomenda-se que a inclusão total de lipídeos não ultrapasse 6 a 7% da matéria seca da dieta, a fim de evitar a queda no consumo de matéria seca (CMS) (OLIVEIRA et al., 2017). Além disso, a suplementação lipídica pode exercer múltiplos efeitos sobre a microbiota, interferindo na fermentação e até prejudicando a digestão caso haja acúmulo excessivo de H₂ no rúmen (PEREIRA et al., 2015; BUENO e ISSAKOWICZ, 2024).

Uma revisão De Assis Pires et al. (2021) destacou diferentes mecanismos pelos quais os lipídeos contribuem para a redução de CH₄. Entre eles estão: a diminuição da matéria orgânica fermentável, a ação direta de ácidos graxos de cadeia média sobre arqueias

metanogênicas, o efeito tóxico dos ácidos graxos poli-insaturados sobre bactérias celulolíticas e protozoários e, ainda, a biohidrogenação dos AGPs, que reduz a disponibilidade de H_2 .

Suplementos ricos em ácidos graxos de cadeia média, como óleo de coco, óleo de palma e óleo de canola — ricos em ácido láurico (C12:0) e ácido mirístico (C14:0) —, têm apresentado impacto marcante na mitigação do metano, sobretudo em dietas com alto teor de concentrado. Embora esses ácidos isoladamente apresentem efeitos consistentes, sua combinação potencializa os resultados, promovendo reduções ainda mais significativas (PEREIRA et al., 2015).

Além dos lipídeos, o tipo de forragem consumida também influencia a produção de metano. Pastagens leguminosas, por exemplo, tendem a gerar menores emissões em comparação às gramíneas. O processamento da forragem, como a ensilagem, também exerce efeito positivo, reduzindo a formação de CH_4 . Em contrapartida, forragens que aumentam o tempo de retenção ruminal ou reduzem a taxa de ingestão tendem a favorecer a produção de metano, devido ao prolongamento da fermentação microbiana (DIAS et al., 2017).

Parte desse efeito é atribuída aos taninos condensados presentes em muitas leguminosas. Esses compostos reduzem a produção de metano por diferentes mecanismos: menor teor de fibra, maior ingestão de matéria seca e maior taxa de passagem no rúmen, fatores que alteram a composição da microbiota e o padrão de fermentação (PEREIRA et al., 2015).

Os taninos, por sua vez, são polifenóis vegetais com forte afinidade por proteínas e outras biomoléculas. Seu efeito anti-metanogênico é reconhecido, em especial pela redução da população de protozoários ruminais. Além disso, exercem atividade antimicrobiana capaz de melhorar a utilização de nutrientes no rúmen (SIQUEIRA e CAVIGLIONI, 2021).

Apesar dos benefícios, o uso de taninos também apresenta limitações. Em concentrações elevadas, esses compostos podem reduzir o consumo de matéria seca, prejudicar a digestibilidade de proteínas e fibras e, em alguns casos, provocar intoxicações em virtude do sabor amargo e do odor característico (BUENO e ISSAKOWICZ, 2024).

No entanto, quando utilizados em doses controladas, os taninos demonstram um potencial significativo para a mitigação das emissões de metano. Estudos apontam que os taninos condensados atuam reduzindo a produção de H_2 , por meio da inibição de arqueias metanogênicas e bactérias fibrolíticas, o que dificulta a formação de CH_4 no rúmen (BAHIA, 2024).

Outro grupo de aditivos amplamente estudado são os ionóforos, representados principalmente por monensina, lasalocida e salinomycin. Esses antimicrobianos reduzem a população de protozoários ciliados e de bactérias Gram-positivas, microrganismos envolvidos

na produção de acetato, butirato e H_2 — substratos essenciais à metanogênese (GONÇALVES et al., 2013).

Com isso, os ionóforos favorecem a produção de propionato, aumentam a eficiência alimentar e reduzem as emissões de metano. Estudos relatam reduções de até 25% nas emissões de CH_4 e cerca de 4% na ingestão voluntária de alimentos, sem prejuízo do desempenho animal (DE ASSIS PIRES et al., 2021).

Do ponto de vista microbiológico, a ação dos ionóforos é seletiva. As bactérias Gram-negativas resistem melhor devido à membrana externa protetora e à produção de propionato, enquanto as Gram-positivas — principais produtoras de acetato, butirato, lactato, H_2 e metano — são mais sensíveis (GONÇALVES et al., 2013).

O mecanismo envolve a alteração do equilíbrio iônico celular. Os ionóforos ligam-se a cátions, transportando-os através da membrana. Para manter a homeostase, a célula ativa intensamente bombas iônicas, consumindo energia em excesso. Esse gasto leva à depleção de ATP, comprometendo o crescimento das Gram-positivas e favorecendo indiretamente as Gram-negativas (RANGEL et al., 2008).

No caso da monensina, não há evidências de inibição direta sobre as bactérias metanogênicas. Seu efeito na redução do metano é considerado indireto, decorrente principalmente da diminuição da população de protozoários ruminais, que produzem hidrogênio — substrato utilizado pelas arqueias metanogênicas. Essa modificação na dinâmica microbiana reduz a disponibilidade de hidrogênio para a metanogênese e, conseqüentemente, as emissões de CH_4 em ruminantes (OLIVEIRA et al., 2017).

Segundo Bueno e Issakowicz (2024), os ionóforos, como a monensina, promovem alterações significativas no metabolismo energético e proteico. Seu efeito bacteriostático ocorre pelo transporte de íons através da membrana celular, resultando em acidificação intracelular, menor síntese de ATP e inativação de microrganismos Gram-positivos, o que impacta diretamente a microbiota ruminal. Essas mudanças favorecem a formação de propionato e reduzem a produção de hidrogênio livre, reforçando o papel da monensina na mitigação indireta da metanogênese (OLIVEIRA et al., 2017). Dessa forma, os ionóforos não apenas contribuem para reduzir a produção de metano, mas também melhoram a eficiência da utilização de energia pelos ruminantes. Isso se reflete em maior produção de propionato, menor relação acetato/propionato, redução de ácido láctico e menor perda de aminoácidos no rúmen, fatores que elevam o desempenho animal e diminuem distúrbios digestivos (LIMA, 2007).

3.3.3. MANEJO DE PASTAGENS E MELHORIA DOS ÍNDICES ZOOTÉCNICOS.

Pesquisas indicam que, entre as medidas iniciais mais eficazes para reduzir a contribuição da bovinocultura às mudanças climáticas, destaca-se o aumento da produtividade por meio do fornecimento de alimentos de maior qualidade. Neste sentido, práticas consagradas — desenvolvimento de sistemas especializados para as diferentes fases produtivas, melhoria das pastagens, suplementação nutricional adequada, adoção do pastejo rotacionado e modelos mais intensivos (semiconfinamento e confinamento) — mostram-se promissoras ao elevar o ganho por animal e reduzir a emissão por unidade de produto. Além disso, sistemas integrados, como a integração lavoura-pecuária (ILP) e os sistemas silvipastoris, vêm se consolidando como alternativas sustentáveis que conciliam aumento de eficiência com conservação ambiental (BERCHIELLI et al., 2012). Nesse quadro, estratégias nutricionais passam a ser instrumentos complementares e essenciais para mitigar emissões em sistemas extensivos. (LIMA, 2007).

Como estratégia prática em sistemas extensivos, recomenda-se priorizar forragens com maior concentração de carboidratos solúveis e introduzir leguminosas que contenham metabólitos secundários — por exemplo, taninos — os quais apresentam eficácia na redução das emissões. Forragens de elevado valor nutritivo melhoram a digestibilidade, elevam o CMS e, por consequência, reduzem a intensidade de metano por kg de produto, mesmo quando a produção absoluta de CH_4 não diminui diretamente. Em outras palavras, a melhora do desempenho zootécnico pode reduzir a pegada climática por unidade produzida, sendo este um ponto crucial para sistemas extensivos (BUENO e ISSAKOWICZ, 2024).

O consórcio de pastagens com leguminosas ou a adoção de bancos de proteína representam estratégias práticas para otimizar a dieta, reciclar nutrientes e aumentar a produtividade por animal e por área. Leguminosas oferecem maior teor de proteína bruta, melhor digestibilidade e, em geral, menor teor de fibra do que gramíneas tropicais. Ademais, espécies que contenham taninos e saponinas exercem efeitos inibitórios sobre microrganismos metanogênicos, contribuindo diretamente para a mitigação das emissões (FIGUEIREDO et al., 2023).

Paralelamente, o aprimoramento genético dos rebanhos configura-se como ferramenta estratégica de longo prazo. A seleção de animais mais eficientes, com menores exigências de manutenção relativas à sua capacidade produtiva, reduz tanto as emissões absolutas ao longo da vida produtiva quanto as emissões relativas (CH_4/kg de carne ou leite). Estudos mostram que a seleção genética orientada para características de eficiência pode gerar reduções substanciais nas emissões entéricas ao longo de décadas — incluindo estimativas de mitigação expressivas quando aplicada de forma sustentada e combinada com manejo adequado. (DE ASSIS PIRES et al., 2021; ZHANG et al., 2019).

Por fim, os ganhos genéticos só alcançam seu potencial quando sincronizados com práticas zootécnicas que os potencializem: uso de animais com alto potencial genético, manejo nutricional apropriado e intensificação técnica visam aumentar o ganho de peso diário, antecipar a idade de abate e melhorar o rendimento de carcaça. Assim, animais que crescem mais rápido exigem menos alimento para manutenção ao longo do ciclo, exigem menos dias até o abate e tendem a emitir menos CH₄ totais por unidade de produto. Portanto, associar melhorias genéticas à gestão da dieta e ao manejo do sistema é a via mais consistente para reduzir a intensidade de emissões na bovinocultura. (DE ASSIS PIRES et al., 2021).

4. METODOLOGIA

Este estudo constitui uma revisão sistematizada da literatura, com abordagem descritiva, realizada entre novembro de 2024 e março de 2026. A metodologia adotada teve como objetivo reunir, analisar e sintetizar estudos científicos sobre a produção de metano na bovinocultura, com foco nas estratégias de mitigação e nos impactos ambientais dessa prática.

4.1. ESTRATÉGIA DE BUSCA

A busca por publicações científicas foi conduzida de forma sistemática em bases amplamente reconhecidas — Google Acadêmico, SciELO, repositórios institucionais da Embrapa e periódicos internacionais —, sendo complementada por consultas a periódicos nacionais e livros técnicos.

Foram identificadas aproximadamente 152 publicações, sendo 52 do Google Acadêmico, 21 da SciELO, 23 de repositórios da Embrapa, 40 de periódicos internacionais, 12 de periódicos nacionais e 4 de livros técnicos.

Após triagem por título e resumo, 98 registros foram excluídos por não atenderem ao escopo do estudo, estarem fora do recorte temporal ou se tratarem de revisões não sistemáticas. Ao final, 54 estudos foram avaliados na íntegra, dos quais 51 atenderam aos critérios de inclusão e compuseram a amostra final.

A estratégia de busca utilizou combinações de palavras-chave associadas a operadores booleanos (AND, OR, NOT), incluindo termos como “metano entérico”, “bovinocultura”, “gases de efeito estufa”, “emissões de metano”, “estratégias de mitigação”, “sistemas de pastagem” e “eficiência alimentar”.

O processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos está apresentado na Figura 4.1.

4.2. CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Os critérios de inclusão foram definidos para assegurar foco e relevância ao tema central. Foram considerados estudos publicados entre 2007 e março de 2026, revisados por pares, disponíveis integralmente e que abordassem a produção de metano na bovinocultura, a eficiência alimentar e as estratégias de mitigação associadas a sistemas tropicais de produção.

Incluíram-se também livros técnicos e relatórios institucionais de reconhecido valor científico.

Foram excluídos trabalhos que não abordavam diretamente a produção de metano entérico ou que não apresentavam dados metodológicos claros. Também foram descartados estudos fora do intervalo temporal definido ou que tratassem de temas paralelos sem relação direta com a mitigação das emissões na pecuária.

Essa filtragem garantiu a consistência e a pertinência das informações analisadas.

4.3. SELEÇÃO DOS ESTUDOS

A seleção dos estudos seguiu um processo progressivo: análise de títulos, triagem de resumos e leitura integral dos textos elegíveis.

A qualidade metodológica, a clareza dos resultados e a coerência das conclusões foram avaliadas criteriosamente. Apenas os trabalhos que atendiam plenamente aos critérios de inclusão foram incorporados à amostra final.

4.4. ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos dados foi realizada de forma qualitativa, priorizando informações diretamente relacionadas aos objetivos do estudo.

Os artigos foram organizados em quatro categorias temáticas:

- (1) produção de metano na bovinocultura;
- (2) impactos ambientais das emissões;
- (3) eficiência alimentar; e
- (4) estratégias de mitigação e manejo de pastagens.

Essa categorização permitiu identificar padrões, tendências e lacunas na literatura, bem como propostas práticas aplicáveis ao contexto brasileiro.

A revisão abrangeu 51 referências, das quais 30 (60%) correspondem a publicações recentes (2021–2025), refletindo a atualidade e relevância do material consultado.

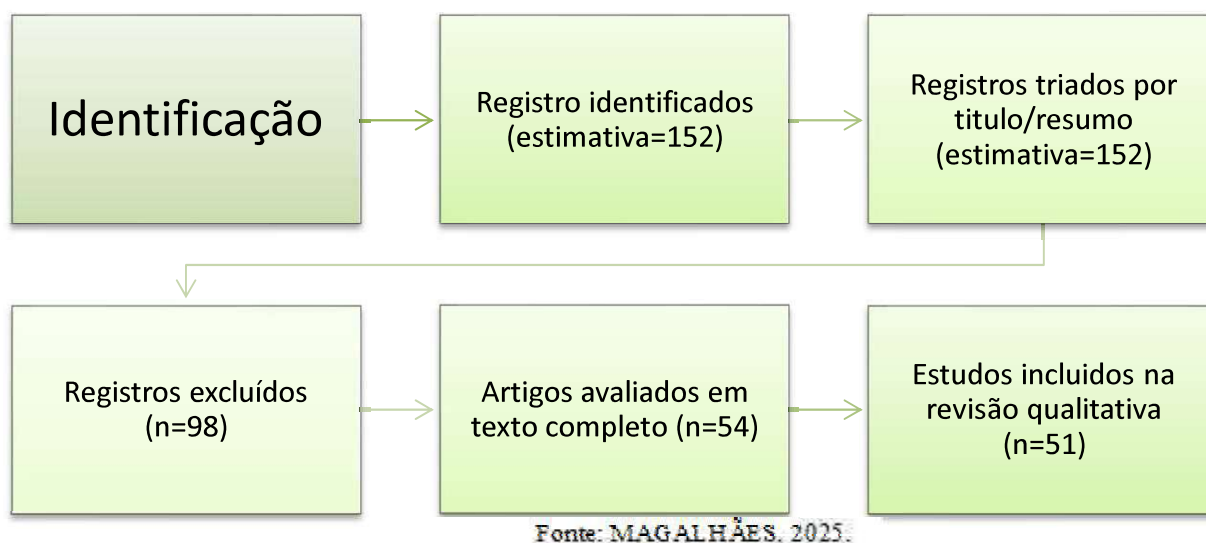
A composição das fontes incluiu 37 artigos científicos, 6 capítulos de livros, 6 relatórios técnicos e 2 documentos institucionais ou teses, conferindo diversidade e robustez acadêmica.

As informações extraídas foram comparadas e interpretadas de forma descritiva, buscando convergências e divergências entre os estudos analisados.

4.5. LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Embora o processo de seleção tenha seguido critérios rigorosos, reconhece-se que toda revisão bibliográfica está sujeita a limitações. A variabilidade metodológica e de qualidade entre os estudos pode influenciar a consistência dos resultados. Além disso, a inclusão restrita a publicações indexadas e aos idiomas português e inglês pode limitar a abrangência de perspectivas. Ainda assim, o rigor aplicado na seleção e análise das fontes assegura confiabilidade, validade científica e representatividade temática aos achados desta pesquisa.

Figura 4.1- Fluxograma do processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos



5. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste estudo fornecem informações relevantes sobre as emissões de metano na bovinocultura, permitindo analisar tanto os níveis absolutos quanto os efeitos de estratégias de mitigação aplicadas. A compreensão desses padrões é essencial para avaliar a eficiência de práticas de manejo e para subsidiar decisões voltadas à sustentabilidade da produção animal.

A emissão de metano entérico (CH_4) na bovinocultura representa um dos principais entraves à sustentabilidade dos sistemas de produção animal. Como apontado por (MACHADO et al., 2011; BAHIA, 2024; BUENO e ISSAKOWICZ, 2024; BERCHIELLI et al., 2012), o metano (CH_4) possui potencial de aquecimento global aproximadamente 28 vezes superior ao dióxido de carbono (CO_2). Diante desse cenário, as estratégias de mitigação vêm sendo discutidas com ênfase crescente, com foco especial na modulação da fermentação ruminal e na eficiência alimentar.

As emissões de metano entérico por bovinos variam amplamente, dependendo do sistema de produção, da dieta, do manejo e das características individuais dos animais (Tabela 5.1). Genro et al. (2023) estimaram uma transferência média de 48 kg de CH_4 por ano para

novilhos de corte no Rio Grande do Sul e 51 kg para fêmeas de corte. De forma semelhante, Vechi et al. (2022) destacaram a importância da fermentação entérica para as emissões totais de CH₄ em sistemas pecuários. Frota et al. (2017) apontaram emissões de aproximadamente 56 kg de CH₄ por ano em bezerros brasileiros destinados à produção de carne, reforçando a variabilidade entre categorias e sistemas de criação. Relatórios recentes Bahia (2024) indicam valores médios de 45–55 kg CH₄/animal/ano para bovinos a pasto e 30–40 kg CH₄/animal/ano para bovinos em confinamento, ilustrando a influência do sistema produtivo sobre a magnitude das emissões.

Em vacas em lactação, Primavesi et al. (2004) reportaram emissões significativamente maiores, entre 121 e 147 kg CH₄ por animal por ano, reflexo do maior peso corporal e da ingestão elevada de matéria seca associada à produção de leite. Comparativamente, estudos na América do Norte e no Leste Europeu registraram emissões mais baixas, na faixa de 100 a 118 kg CH₄ por animal por ano, mesmo considerando vacas com alto desempenho produtivo (PRIMAVESI et al., 2004).

Essas diferenças sugerem que fatores regionais, como tipo de pastagem, dieta, genética e manejo, exercem papel determinante nas emissões de metano entérico (BERCHIELLI et al., 2012; CARDOSO et al., 2016; BUENO e ISSAKOWICZ, 2024; BAHIA, 2024).

De forma geral, a literatura evidencia que não há um único valor representativo para emissões anuais de CH₄ por animal, sendo necessário considerar o contexto do sistema produtivo. A comparação entre vacas em lactação e novilhos de corte destaca que a produção animal, especialmente a lactação, é um dos principais fatores que influenciam a magnitude das emissões (PRIMAVESI et al., 2004). Esses achados reforçam a importância de estratégias de mitigação adaptadas às características específicas de cada sistema, levando em conta a dieta, manejo e estágio produtivo dos animais (FROTA et al., 2017).

As perdas de energia na forma de metano entérico são amplamente relatadas na literatura, situando-se, entre 4% e 12% da energia bruta ingerida pelos ruminantes (Tabela 5.2). Rivera et al. (2010) apontaram que tais perdas podem alcançar de 6 a 18% da energia bruta consumida, enquanto Pereira et al. (2015) estimaram valores médios entre 5,5 e 6,5%. No Brasil, Frota et al. (2017) reportaram faixas de 5,81 a 7,86% em bovinos mantidos em diferentes sistemas de produção, e Primavesi et al. (2004) encontraram variações entre 4 e 9%, com média de 6%. De forma semelhante, Pereira (2013), em experimentos conduzidos em câmaras respirométricas, observou valores que variaram de 2 a 12%, demonstrando a amplitude de resultados conforme o método de mensuração, valor também demonstrado por Xie et al (2025).

A composição da dieta exerce influência determinante sobre essas perdas. Machado et al. (2011) verificaram que novilhas alimentadas com gramíneas apresentaram perdas de até 9,6% da energia bruta ingerida, enquanto aquelas mantidas em dietas à base de alfafa registraram valores próximos a 6,2%, evidenciando o papel da qualidade e composição da forragem na intensidade da metanogênese. Essa tendência também foi observada por Oliveira et al. (2017), que destacaram perdas mais elevadas em sistemas baseados em forragem em comparação a dietas de confinamento.

Apesar da variabilidade metodológica e das diferenças regionais, há consenso de que a produção de metano representa uma perda significativa de energia no processo fermentativo. Stella et al. (2020) e Lima (2007) indicaram que tais perdas podem alcançar 18% da energia bruta ingerida, especialmente em dietas volumosas. Estimativas mais recentes reforçam esse impacto: Figueiredo et al. (2023) relataram perdas de até 12% da energia bruta, enquanto Dias et al. (2017) apontaram que a formação de metano pode representar até 14% da energia digestível consumida.

Portanto, a literatura converge no reconhecimento de que a produção de CH₄, além de seu papel como importante gás de efeito estufa, implica perdas substanciais de eficiência energética nos sistemas de produção animal (XIE et al., 2025).

Tabela 5.1- Resumo dos artigos com valores anuais reportados (kg CH₄/animal/ano)

Autor/Ano	Sistema/Dieta	Emissão anual (kg CH ₄ /animal/ano)
Frota et al., 2017	Novilhos a pasto (Amazon)	56
Genro et al., 2023	Novilhos / Fêmeas de corte (RS)	48 / 51
Bahia, 2024	Bovinos a pasto / confinamento	45–55 / 30–40
Primavesi et al., 2004	Vacas em lactação (Brasil)	121–147
Primavesi et al., 2004	Vacas em lactação (América do Norte e no Leste Europeu)	100 –118

Fonte: (FROTA et al., 2017); (GENRO et al., 2023); (BAHIA, 2024); (PRIMAVESI et al., 2004).

A mitigação das emissões de metano entérico na bovinocultura tem sido estudada como uma prioridade para reduzir o impacto ambiental da atividade. Estratégias nutricionais, como a inclusão de lipídios vegetais, taninos e subprodutos da indústria de destilarias, têm mostrado potencial de reduzir a produção de metano por unidade de produto (ARAÚJO et al., 2021; FONSECA et al., 2021; VIEIRA et al., 2021). Entretanto, os efeitos nem sempre são consistentes: Frota et al. (2017) e Genro et al. (2023) relataram reduções significativas em sistemas a pasto e suplementados, enquanto Bahia (2024) destacou que a eficácia depende da

composição da dieta, qualidade da forragem e manejo alimentar, apontando limitações práticas em diferentes contextos produtivos.

Práticas de manejo, como melhoria da qualidade das pastagens, integração lavoura-pecuária e sistemas silvipastoris, representam outra abordagem para mitigar emissões. Estudos indicam que sistemas intensivos podem apresentar reduções mais consistentes (GENRO et al., 2023; CARDOSO et al., 2016), enquanto em sistemas extensivos os efeitos dependem fortemente da suplementação e do manejo do pastejo (FROTA et al., 2017; LIMA, 2007). Essa variabilidade evidencia que o sucesso das estratégias de manejo não está apenas na redução do metano, mas também na manutenção da eficiência produtiva e viabilidade econômica.

Dessa forma, a mitigação do metano na bovinocultura se apresenta como um desafio multifatorial, uma vez que nenhuma estratégia isolada demonstra eficácia consistente em todos os sistemas produtivos. Estudos indicam que a combinação de abordagens nutricionais, manejo de pastagens e, eventualmente, seleção genética ou uso de aditivos, é necessária para alcançar reduções efetivas de emissões (FROTA et al., 2017; GENRO et al., 2023; BAHIA, 2024; ZHANG et al., 2019) (Tabela 5.3). Essa integração permite conciliar a redução do metano com a manutenção da eficiência produtiva e a viabilidade econômica, destacando a importância de estratégias adaptadas à realidade de cada sistema (CARDOSO et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2021).

Tabela 5.2- Perda de energia bruta (EB) convertida em metano (CH₄) em diferentes sistemas e dietas de bovinos

Autor/Ano	Sistema/Dieta	Faixa de perda de EB convertida em CH₄ (%)
Primavesi et al. (2004)	Vacas leiteiras (Brasil)	4 – 9
Pereira (2013)	Diversos, câmaras respirométricas	2 – 12
Frota et al. (2017)	Bovinos em sistemas variados	5,81 – 7,86
Machado et al. (2011)	Novilhas em gramínea vs. alfafa	6,2 (alfafa) – 9,6 (gramínea)
Oliveira et al. (2017)	Comparação forragem vs. confinamento	2 - 15
Lima (2007)	Ruminantes (geral)	4 – 12
Stella et al. (2020)	Dietas forrageiras	6 – 18

Figueiredo et al. (2023)	Bovinos (estimativa geral)	Até 12
Dias et al. (2017)	Ruminantes (energia digestível)	Até 14
Fonseca et al. (2019)	Bovinos em forragens tropicais	6 – 12
Riviera et al. (2010)	Novilhos de corte em dietas tropicais	5 – 7
Xie et al. (2025)	Ruminantes (geral)	2 - 12

Fonte: Adaptado de PRIMAVESI et al. (2004); PEREIRA (2013); FROTA et al. (2017); MACHADO et al. (2011); OLIVEIRA et al. (2017); LIMA (2007); STELLA et al. (2020); FIGUEIREDO et al. (2023); DIAS et al. (2017); RIVERA et al. (2010); PEREIRA et al. (2015); XIE et al. (2025).

À luz das evidências, Beauchemin et al. (2007) indicam que a inclusão de lipídios pode reduzir a metanogênese ao inibir protozoários ruminais e alterar a fermentação de fibras. Estudos posteriores reforçam esse potencial. Oliveira et al. (2017) relatam redução média de 5,6% na emissão de CH₄ para cada 1% de lipídio adicionado à matéria seca. Esse efeito está associado à substituição parcial dos carboidratos fermentáveis e à modificação da microbiota ruminal, com impacto na disponibilidade de hidrogênio para as arqueias metanogênicas.

Tabela 5.3- Estratégias de mitigação de metano em bovinos agrupadas por tipo de intervenção

Tipo de Estratégia	Autor (Ano)	Sistema	Efeito sobre Metano	Método de medição
Nutricional – ajustes na dieta e suplementação	Frota et al., 2017	Pasto pleno sol e silvipastoril	Redução significativa (silvipastoril; redução moderada a pasto)	SF ₆ tracer
	Genro et al., 2023	Pasto (RS)	Redução moderada significativa, maior (sistemas intensivos)	Modelagem /inventário
	Vieira et al., 2021	Pasto e confinamento	Redução moderada metano	Inventário / fator de emissão (estimativa)
	Stella et al., 2020	Bovinos a pasto com uso de cereais	Redução moderada	Meta-análise
	Beauchemin et al., 2007	Bovinos confinados	Redução significativa	Revisão (câmaras, SF ₆ e outros)
	Palangi; Lackner, 2022	Sistemas variados	Redução moderada significativa	Revisão (<i>in vitro</i> e <i>in vivo</i>)
	Rivera et al., 2010	Pasto e feno	Redução moderada	Compilação <i>in vitro</i> e <i>in vivo</i>
	Patra; Lalhriatpuia, 2022	Leite e corte (pasto × confinamento)	Menor intensidade	Revisão/compilação com dados experimentais
Lipídios	Beauchemin et al., 2007	Bovinos confinados	Redução significativa	Revisão (câmaras, SF ₆ , etc.)

	Carvalho et al., 2016	Novilhos a pasto com óleo de linhaça	Redução significativa	SF ₆ tracer
Taninos e compostos vegetais	Bahia, 2024	Sistemas de corte variados	Redução moderada dependente da dieta	Meta-análise (inclui câmaras e outros)
	Magnani et al., 2023	Bovinos confinados	Redução moderada	SF ₆ tracer
Ionóforos	Gonçalves et al., 2013	Bovinos de corte	Redução moderada	Artigo técnico / revisão
	Cooke et al., 2024	Monensina em bovinos de corte	Redução moderada significativa	Meta-análise (SF ₆ , GreenFeed, câmaras)
Manejo de pastagem	Lima, 2007	Pasto extensivo	Redução limitada	Inventário / revisão técnica (Embrapa)
	Frota et al., 2017	Pasto extensivo	Redução moderada	SF ₆ tracer
	Gere et al., 2024	Pastagens com leguminosas/ culturas de cobertura	Redução da intensidade	Ensaio a campo
Integração de sistemas (lavoura-pecuária-floresta)	Oliveira et al., 2021	Sistemas integrados	Redução moderada significativa	Capítulo / compilação (estudos primários)
	De Assis Pires et al., 2021	Sistemas integrados	Redução moderada significativa	Capítulo / compilação (FEPE)
	Flores-Coello et al., 2023	Silvipastoril intensivo	Redução da intensidade (CH ₄ /kg produto)	Experimento a campo / avaliação
Intensificação produtiva	Cardoso et al., 2016	Bovinos de corte	Redução moderada significativa por unidade produto	Modelagem / inventário
	Meo-Filho et al., 2022	Pastagens intensificadas (Mata Atlântica)	Redução moderada significativa por unidade produto	Ensaio a campo / avaliação
	Duthie et al., 2017	Raças/dietas (corte)	Diferença aparece intensidade (CH ₄ / carcaça/produção)	Medições diretas / ajuste por produto
Seleção genética	Zhang et al., 2019	Bovinos leiteiros	Redução potencial a longo prazo (traços de CH ₄)	Análise genética / predição
	Løvendahl et al., 2022	Bovinos leiteiros (Holandesa)	Herdabilidade moderada MeP/MeC influenciada intensidade	Análise genética com dados fenotípicos
	Ferraz et al., 2024	Bovinos zebuínos (Nelore)	Variabilidade genética (C diário; CH ₄ res) para seleção direta	GWAS / fenótipo via SF ₆
Estratégias combinadas / Inibidores de metanogênese	Machado et al., 2011	Diversos sistemas	Redução moderada significativa	Capítulo / revisão / compilação

Xie et al., 2025	Confinamento e pasto	Redução significativa	Revisão (<i>in vitro</i> e <i>in vivo</i>)
Fonte: (FROTA et al., 2017; GENRO et al., 2023; BAHIA, 2024; VIEIRA et al., 2021; ZHANG et al., 2019; CARDOSO et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2021; PALANGI; LACKNER, 2022; GONÇALVES et al., 2013; STELLA et al., 2020; RIVERA et al., 2010; LIMA, 2007; DE ASSIS PIRES et al., 2021; BEAUCHEMIN et al., 2007; CARVALHO et al., 2016; MACHADO et al., 2011; XIE et al., 2025; COOKE et al., 2024; MAGNANI et al., 2023; FONSECA et al., 2023; PATRA; LALHRIATPUIA, 2022; DUTHIE et al., 2017; LØVENDAHL et al., 2022; FERRAZ et al., 2024; MEO-FILHO et al., 2022; GERE et al., 2024; FLORES-COELLO et al., 2023).			

Carvalho et al. (2016) demonstram que o efeito dos lipídios sobre a emissão de metano é dependente do tipo e da concentração da fonte lipídica, bem como da composição da dieta, podendo resultar em reduções expressivas, como no uso de óleo de linhaça. No entanto, a ausência de um padrão consistente entre diferentes condições experimentais indica que esse efeito não pode ser generalizado. Na prática, isso sugere que a resposta observada em condições controladas tende a superestimar o impacto dos lipídios quando aplicada a sistemas produtivos mais heterogêneos. Além disso, níveis elevados de inclusão podem comprometer o consumo voluntário e a digestibilidade da fibra, o que coloca em evidência um possível trade-off entre mitigação de metano e desempenho animal.

Essa limitação é reforçada por Araújo et al. (2021), que mostram que alterações na dieta afetam simultaneamente o ambiente ruminal e a produção de metano, mas sem

indicar respostas uniformes. Fonseca et al. (2021) complementam essa interpretação ao evidenciar que a resposta em digestibilidade e na emissão de metano depende do nível de inclusão dos ingredientes e da fase produtiva dos animais. Assim, embora os lipídios sejam frequentemente apontados como estratégia mitigadora, os dados indicam que sua eficácia é condicionada e, em muitos casos, limitada, exigindo ajustes específicos para cada sistema produtivo.

Na sequência, os taninos surgem como outra estratégia de mitigação de CH₄, embora seus mecanismos sejam menos elucidados. Magnani et al. (2023) descrevem duas vias principais de ação — inibição direta de microrganismos metanogênicos e redução de substratos, sobretudo H₂, por meio da formação de complexos com fibra e proteína — e reportam reduções de até 17,3% nas emissões diárias em animais suplementados. Apesar desses resultados expressivos, a literatura indica que os efeitos não são uniformes: Bahia (2024) encontrou reduções médias mais modestas, entre 10–15% em bovinos de corte.

A resposta da produção de CH₄ entérico ao uso de taninos é altamente variável, influenciada por fatores como fonte, tipo e peso molecular dos compostos, além da comunidade metanogênica presente no animal (FONSECA et al., 2023). Os mesmos autores ainda destacam que parte da redução observada pode decorrer da queda no consumo e na digestibilidade, questionando a real eficácia do aditivo. Em contraponto, Sosa-Pérez et al. (2024) atribuem a

variabilidade sobretudo à origem botânica, uma vez que diferentes leguminosas modulam a microbiota ruminal de formas distintas. Essa divergência evidencia que os taninos possuem potencial mitigador, mas sua aplicação prática exige maior definição de tipo e dose para reduzir CH₄ sem comprometer o desempenho animal (FONSECA et al., 2023).

Nesse mesmo contexto de aditivos nutricionais, os ionóforos apresentam resultados mais consistentes e previsíveis em relação à mitigação de metano (MARQUES; COOKE, 2021). Guo et al. (2006) afirmam que a suplementação com ionóforos reduz significativamente as emissões entéricas de CH₄ em 27–30% nas primeiras semanas, independentemente do teor de concentrado da dieta. Embora a concentração total de ácidos graxos voláteis não se altera, a razão acetato:propionato e as populações de protozoários ciliados são reduzidas em até 82,5%, retornando aos níveis iniciais em 4–6 semanas, dependendo da dieta (GUAN et al., 2006). Esses dados sugerem que a diminuição do metano está associada à redução temporária de protozoários, que se adaptam rapidamente às dietas suplementadas, limitando a durabilidade do efeito antimetanogênico (GUO et al., 2022).

Apesar da eficácia inicial, estudos em vacas leiteiras mostram que a redução sustentada de CH₄ é relativamente modesta, entre 7 e 9% ao longo de seis meses, e em alguns casos as emissões retornam aos níveis basais após 30 dias de suplementação (MARQUES e COOKE, 2021). Em bovinos de corte, a inclusão de monensina reduziu a produção de CH₄ em 8–12%, favorecendo o aumento do propionato em detrimento do metano (GONÇALVES et al., 2013). Esses resultados evidenciam que a resposta à monensina é altamente dependente da duração da suplementação, da dosagem e da composição da dieta, e que a adaptação microbiana representa uma limitação significativa à eficácia prolongada (GUO et al., 2022; COOKE et al., 2024).

Cooke et al. (2024) relatam que a média geral de redução de CH₄ *in vivo* reportada é de 17,5 g/d, representando cerca de 15% das emissões, reforçando que, embora a monensina seja eficaz, sua ação não é absoluta nem linear, e a magnitude da redução depende de múltiplos fatores, incluindo tipo de animal, dieta e manejo. Assim, os ionóforos permanecem ferramentas valiosas para mitigar emissões e melhorar a eficiência energética, mas devem ser aplicados com avaliação crítica, planejamento nutricional e acompanhamento rigoroso, reconhecendo que a adaptação microbiana é um fator que limita a sustentação do efeito antimetanogênico (GUO et al., 2022).

As estratégias apresentadas por Genro et al. (2023) demonstram que a mitigação das emissões de metano na pecuária não depende de ações isoladas, mas de um conjunto articulado de medidas que envolvem manejo, genética e nutrição. O manejo adequado das pastagens e o

melhoramento genético, aliados ao ajuste das dietas com níveis equilibrados de proteína e concentrado, podem reduzir as emissões de CH₄ por unidade de produto. Essa visão é reforçada por De Assis Pires et al. (2021), ao apontarem que sistemas integrados elevam a eficiência do uso da energia e otimizam a ciclagem de nutrientes, contribuindo diretamente para a mitigação dos gases de efeito estufa.

Contudo, Fonseca et al. (2023) ponderam que a intensificação deve ser conduzida com equilíbrio, pois o uso excessivo de insumos pode reduzir parte dos ganhos ambientais. No caso da alimentação, dietas com teores crescentes de concentrado representam uma estratégia eficiente para reduzir a produção de metano, especialmente quando a inclusão ultrapassa 60% da matéria seca, proporção em que ocorre queda significativa do pH ruminal e consequente inibição das arqueias metanogênicas (OLIVEIRA et al., 2017). Essa resposta, embora dependa do tipo de alimento e da adaptação dos animais, indica que o uso de concentrados, quando tecnicamente ajustado, é um aliado importante na mitigação do CH₄ entérico.

A influência da forragem sobre a produção de metano é amplamente reconhecida, embora dependa da qualidade e do manejo adotado. Pastagens de leguminosas geralmente resultam em menores emissões de CH₄ do que as de gramíneas, devido à maior digestibilidade e ao menor teor de fibra, fatores que modificam o perfil fermentativo e reduzem o hidrogênio disponível no rúmen (LIMA, 2007; BERCHIELLI et al., 2012; DIAS et al., 2017; STELLA et al., 2020). Ainda assim, Lima (2007) e Berchielli et al. (2012) ressaltam que o estágio de maturação da planta e o método de conservação são determinantes: forragens jovens e bem conservadas tendem a reduzir as emissões, enquanto plantas mais velhas e fibrosas aumentam a fermentação metanogênica. Machado et al. (2013) e Stella et al. (2020) acrescentam que a simples substituição de espécies forrageiras ou o uso de silagem não garantem, por si só, uma menor emissão — o fator decisivo é a qualidade final da dieta fornecida ao animal.

O manejo do pastejo exerce papel decisivo na mitigação das emissões de metano, especialmente pela influência direta sobre a qualidade e a digestibilidade da forragem. Lima (2007) e Berchielli et al. (2012) observaram que pastagens degradadas, com baixo valor nutritivo e elevado teor de fibra, resultam em maiores perdas de energia sob a forma de CH₄, em virtude da menor eficiência fermentativa no rúmen. Em contrapartida, Stella et al. (2020) e Dias et al. (2017) demonstraram que o pastejo rotacionado, ao manter o capim em estágio vegetativo e com maior teor de proteína, eleva a digestibilidade da dieta e reduz a intensidade das emissões. Esses resultados reforçam que o manejo adequado das pastagens não apenas aumenta a produtividade, mas também melhora a eficiência ambiental do sistema.

No entanto, Machado et al. (2013) alertam que a redução excessiva da fibra, sem o equilíbrio necessário no fornecimento de carboidratos estruturais, pode comprometer a fermentação ruminal e afetar o metabolismo microbiano. Assim, a mitigação do metano deve estar associada ao equilíbrio entre qualidade da forragem e estabilidade fermentativa, evitando extremos nutricionais. Evidências apresentadas por Oliveira et al. (2017) confirmam esse efeito positivo do manejo: enquanto animais mantidos em pastagens degradadas no Brasil produzem cerca de 25.227 kg de CH₄, aqueles em sistemas intensivos, com pastagens bem manejadas ou confinamento, reduzem essa emissão para aproximadamente 16.685 kg. Esses dados sustentam que o manejo eficiente do pasto, aliado à manutenção do equilíbrio nutricional, é uma das estratégias mais consistentes para reduzir as emissões entéricas sem comprometer o desempenho produtivo.

Resultados recentes confirmam que a diversificação de pastagens, com a inclusão de leguminosas e culturas de cobertura, melhora o aproveitamento de nutrientes e reduz a intensidade das emissões. Gere et al. (2024) observaram que, em sistemas integrados de pastejo, a presença de leguminosas aumentou a digestibilidade e reduziu as emissões de CH₄ por unidade de ganho de peso, reforçando o papel das pastagens de alta qualidade na mitigação entérica.

A suplementação também se apresenta como estratégia relevante, embora seus efeitos variem conforme a forma de utilização. Rivera et al. (2010), Pereira (2013) e Berchielli et al. (2012) relatam que suplementos energéticos e proteicos favorecem a rota propionogênica, diminuindo o hidrogênio disponível para as arqueias metanogênicas. Contudo, Crespo et al. (2023) e Bahia (2024) lembram que o aumento do consumo alimentar pode elevar as emissões absolutas, mesmo quando há redução relativa por quilo de produto. O resultado final depende, portanto, da integração entre o manejo das pastagens, o tipo de suplemento e a eficiência global do sistema produtivo.

Berchielli et al. (2012) estimam que, mantendo-se o ritmo de avanço produtivo observado nas últimas décadas, seria possível elevar em 25% a produção de carne com apenas 3% de acréscimo nas emissões totais. De modo complementar, Meo-Filho et al. (2022) reforçam que pastagens de alta qualidade associadas ao uso de genética superior reduzem a emissão de metano por unidade de produto. Ainda assim, De Assis Pires et al. (2021) e Fonseca et al. (2023) alertam que, sem um planejamento adequado, a intensificação pode aumentar as emissões indiretas em razão do uso excessivo de insumos. Conforme destacam De Assis Pires et al. (2021) e Genro et al. (2023), a adoção conjunta de práticas como o pastejo rotacionado, o corte no ponto ideal e a suplementação equilibrada é essencial para que o aumento da produtividade

ocorra de forma sustentável, evitando os efeitos compensatórios de emissões adicionais relatados por Fonseca et al. (2023) e Berchielli et al. (2012).

De forma semelhante, Flores-Coello et al. (2023) relataram que sistemas silvipastoris intensivos, ao aliarem sombreamento arbóreo e alta qualidade de forragem, reduziram significativamente a produção de CH₄ entérico por unidade de produto, além de mitigar o estresse térmico e melhorar a eficiência alimentar dos bovinos. Esses resultados reforçam a relevância de estratégias de intensificação que integrem componentes arbóreos e forrageiros, conforme também proposto por De Assis Pires et al. (2021).

Estudos recentes demonstram que a forma como as emissões de metano é expressa altera profundamente a interpretação do impacto ambiental dos diferentes sistemas de produção. Patra e Lalhriatpuia (2022) evidenciaram que os valores absolutos de emissão (g CH₄/dia) variam amplamente entre categorias animais e sistemas, mas essas diferenças se tornam muito menores quando as emissões são expressas por unidade de produto. Conforme apresentado na Tabela 5.4, vacas leiteiras de alta produção, apesar de emitirem maiores volumes totais de metano, apresentaram menor intensidade (g CH₄/kg de leite corrigido) em comparação às vacas mantidas exclusivamente a pasto. Essa relação inversa entre produtividade e intensidade de emissão reforça que a eficiência produtiva é o principal determinante ambiental, e não o volume absoluto de gás liberado. Assim, analisar apenas o CH₄ diário por animal pode gerar interpretações distorcidas sobre a real sustentabilidade do sistema.

Tabela 5.4- Comparação de indicadores de emissão entérica de metano em diferentes sistemas de produção de bovinos.

Categoria sistema	animal	/	CH₄ (g/dia)	CH₄ (g/kg MS ingerida)	CH₄ (g/kg produto)*	Tipo de sistema
Vacas leiteiras (alta produção)	(alta)		380 – 480	17 – 22	10 – 14 (leite corrigido para energia)	Confinado / semi-intensivo
Vacas leiteiras (a pasto)			320 – 410	21 – 26	13 – 18	Extensivo / pastejo
Bovinos de corte em crescimento	em		150 – 220	18 – 25	160 – 210 (por kg ganho de peso)	Pasto
Bovinos de corte confinados	corte		130 – 180	13 – 19	120 – 170 (por kg ganho de peso)	Confinamento

Fonte: adaptado de Patra e Lalhriatpuia (2022).

*Produto = kg de leite (para vacas) ou kg de ganho de peso (para bovinos de corte).

A Tabela 5.4 mostra que as emissões entéricas variam não apenas entre categorias animais, mas também em função do tipo de sistema de produção. Vacas leiteiras de alta produção em sistemas confinados ou semi-intensivos apresentam maiores emissões absolutas (380–480 g CH₄/dia), porém menor emissão por unidade de produto (10–14 g CH₄/kg de leite

corrigido para energia), quando comparadas às vacas mantidas exclusivamente a pasto, que emitem 320–410 g CH₄/dia, mas com intensidade de 13–18 g CH₄/kg de leite (Patra; Lalhriatpuia, 2022). Em outras palavras, o animal confinado pode emitir mais metano por dia, mas “dilui” essas emissões em maior volume de leite. Esse contraste confronta a ideia simplista de que sistemas a pasto são automaticamente “mais sustentáveis” em termos de metano, ao evidenciar que a métrica por unidade de produto é mais informativa do que os valores absolutos.

Sob a ótica energética, os dados de Machado et al. (2011) e Berchielli et al. (2012) ajudam a explicar essas diferenças de eficiência. Uma vaca leiteira de aproximadamente 600 kg pode emitir entre 268 e 450 g de CH₄ por dia, resultando em uma perda em torno de 13,344 kcal por grama de metano, energia suficiente para a produção de 4,55 a 7,65 kg de leite com 4 % de gordura (Machado et al., 2011). Berchielli et al. (2012) destacam que essa dissipação pode representar de 5 % a 9 % da energia bruta consumida pelos ruminantes. Ao confrontar esses valores com os da Tabela 5.4, fica claro que sistemas que aumentam a produtividade por animal — reduzindo g CH₄/kg de produto — tendem a aproveitar melhor a energia da dieta, mesmo quando as emissões diárias são iguais ou ligeiramente superiores. Assim, a emissão de metano deixa de ser apenas um problema ambiental e passa a ser um indicador de ineficiência bioenergética: quanto maior a fração da energia bruta perdida como CH₄, menor o retorno em leite ou carne por unidade de alimento consumido.

O mesmo padrão foi observado para os bovinos de corte. Animais confinados, embora apresentem maior ingestão de matéria seca e ganho de peso diário, emitem menos metano por quilo de ganho de peso vivo em comparação aos mantidos a pasto (PATRA; LALHRIATPUIA, 2022). Isso ocorre porque dietas com maior densidade energética reduzem o teor de fibra e favorecem rotas fermentativas que produzem mais propionato e menos hidrogênio disponível para metanogênese. Esses resultados convergem com os de Genro et al. (2023) e De Assis Pires et al. (2021), que também observaram menor intensidade de emissão em sistemas tropicais mais produtivos, indicando que o aumento da eficiência zootécnica pode reduzir o impacto ambiental quando acompanhado de bom manejo nutricional.

Os achados de Duthie et al. (2017) reforçam essa interpretação ao demonstrar que a raça, isoladamente, não exerce influência significativa sobre a emissão total de CH₄, mas que a diferença entre genótipos se manifesta quando os dados são ajustados para a produção de carne. Nesse caso, o CH₄ emitido por kg de carne de carcaça mostrou-se um indicador mais sensível e realista da eficiência ambiental. Bovinos de melhor conversão alimentar apresentaram menor intensidade de emissão, enquanto animais com pior rendimento energético emitiram

proporcionalmente mais metano por unidade de produto. Esses resultados consolidam a ideia de que não basta reduzir o CH₄ absoluto, mas sim aumentar a eficiência por produto gerado, transformando a mitigação em resultado direto da produtividade.

O melhoramento genético dos rebanhos representa uma das estratégias mais consistentes para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) na pecuária. De Assis Pires et al. (2021) destacam que a seleção de animais mais eficientes, com menores exigências de manutenção e maior capacidade produtiva, resulta em ganhos significativos na eficiência alimentar e na mitigação do CH₄. Esses animais tendem a atingir o peso de abate em menor tempo, reduzindo tanto as emissões absolutas (CH₄ por vida produtiva) quanto as relativas (CH₄ por quilograma de carne ou leite produzido). Assim, o melhoramento genético atua como um fator de mitigação de longo prazo, ao alinhar eficiência produtiva e sustentabilidade ambiental dentro dos programas de seleção animal.

Por outro lado, Zhang et al. (2019) e Løvendahl et al. (2022) ampliam essa discussão ao demonstrarem que a variabilidade genética para traços associados à emissão de metano permite identificar e selecionar animais intrinsecamente mais eficientes. No entanto, ambos alertam que a seleção baseada apenas em desempenho produtivo pode reduzir a intensidade de emissão sem necessariamente diminuir o total liberado de CH₄. Esse contraponto evidencia a importância de definir corretamente os traços genéticos utilizados na seleção — como a produção (MeP) ou a concentração (MeC) de metano — para assegurar ganhos reais de mitigação.

Em consonância, Ferraz et al. (2024) comprovaram que esse princípio também se aplica a raças zebuínas, como o Nelore, indicando que o potencial genético para eficiência e baixa emissão não se restringe a rebanhos europeus, mas pode ser explorado nas condições tropicais brasileiras. A intensidade de emissão (g CH₄/kg de leite ou carne) tem se mostrado o indicador mais consistente para avaliar a eficiência ambiental dos sistemas pecuários, pois expressa o impacto em relação ao produto gerado (PATRA; LALHRIATPUIA, 2022). Diferentemente dos valores absolutos, essa métrica considera o equilíbrio entre produtividade, consumo e eficiência alimentar, permitindo comparações mais precisas entre sistemas e categorias (DUTHIE et al., 2017).

Os resultados de campo confirmam que o avanço rumo a uma pecuária de baixa emissão depende essencialmente da eficiência produtiva, e não da redução do rebanho (GENRO et al., 2023). Assim, o foco deve recair sobre práticas de manejo e nutrição capazes de elevar o desempenho por unidade de produto, aliadas a programas de melhoramento genético voltados

à eficiência alimentar e à redução da intensidade de emissão (ZHANG et al., 2019; FERRAZ et al., 2024).

A adoção combinada de estratégias nutricionais, genéticas e de manejo consolida um dos caminhos mais consistentes para conciliar produtividade e mitigação das emissões de metano na pecuária brasileira. A recuperação de pastagens degradadas e os sistemas integrados de Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) têm se mostrado eficazes em reduzir as emissões por unidade de produto, pela melhoria da digestibilidade e aumento do sequestro de carbono no solo (DE ASSIS PIRES et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2021). Embora sistemas intensivos possam apresentar maiores emissões absolutas, sua maior eficiência alimentar resulta em menor intensidade de emissão, reafirmando que produtividade e sustentabilidade são dimensões complementares, quando o manejo é tecnicamente orientado.

O melhoramento genético animal, o uso planejado de aditivos alimentares e as técnicas de manipulação da fermentação ruminal, especialmente em vacas leiteiras de alta produção e gado confinado, contribuem para otimizar o aproveitamento energético e reduzir as perdas associadas à formação de CH₄ (BERCHIELLI et al., 2012). De modo convergente, o abate precoce atua como estratégia adicional para encurtar o ciclo produtivo e diminuir o tempo de emissão por animal, reforçando o papel da intensificação racional na sustentabilidade dos sistemas (ZHANG et al., 2019).

Por fim, conforme o Observatório do Clima e SEEG (2025), as metas de alcançar 68 % dos rebanhos com manejo nutricional aprimorado, 45 % com melhoramento genético e o abate anual de cerca de 7,5 milhões de bovinos sob Terminação Intensiva (TI) até 2035 configuram um conjunto integrado de ações em direção a uma pecuária de baixo carbono. A TI, adotada em sistemas de confinamento, semiconfinamento ou suplementação, atua como complemento estratégico às demais práticas, ao reduzir o tempo de engorda e o período de emissão entérica.

De modo geral, os resultados apresentados e discutidos evidenciam que a mitigação das emissões de metano na bovinocultura depende da integração equilibrada entre nutrição, genética, manejo e intensificação racional.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu compreender que a mitigação das emissões de metano entérico em ruminantes depende da integração entre nutrição, manejo e genética, sustentada por uma visão sistêmica da produção animal. As evidências analisadas indicam que a intensificação produtiva, quando conduzida de forma técnica e responsável, pode reduzir a intensidade de emissão de CH₄ sem comprometer o desempenho zootécnico dos animais. Essa constatação reforça a importância de se buscar eficiência, e não apenas expansão, como eixo da sustentabilidade pecuária.

As estratégias nutricionais, como o aumento da proporção de concentrados na dieta, a inclusão moderada de lipídios e o uso de aditivos naturais (taninos, saponinas e ionóforos), mostraram-se eficazes na mitigação parcial das emissões. No entanto, seus resultados variam conforme o tipo de dieta, o ambiente ruminal e a adaptação dos animais, revelando a necessidade de abordagens ajustadas às condições locais. De modo semelhante, o manejo adequado das pastagens e o melhoramento genético de rebanhos mais eficientes em conversão alimentar se destacam como pilares complementares no controle das emissões.

Entretanto, é importante reconhecer as limitações do tema. A variabilidade dos resultados entre experimentos, a complexidade da microbiota ruminal e a ausência de padronização metodológica em estudos de campo ainda dificultam a comparação direta entre estratégias. Além disso, a maioria dos estudos concentra-se em condições controladas, o que nem sempre reflete a realidade das propriedades de base familiar e dos sistemas tropicais extensivos.

A análise teórica e empírica converge para a compreensão de que a mitigação do metano entérico não é uma meta isolada, mas parte de um processo de aprimoramento contínuo da eficiência produtiva e ambiental. O conhecimento acumulado até o momento demonstra coerência entre a teoria da eficiência bioenergética e os resultados observados em sistemas integrados e de manejo sustentável.

Como encaminhamento futuro, destaca-se a necessidade de continuar os estudos sobre animais mais eficientes na utilização dos nutrientes e na redução das emissões de metano, bem como o aprimoramento das práticas de manejo e alimentação que favoreçam essa eficiência. A consolidação dessas estratégias representa não apenas um avanço técnico, mas um compromisso ambiental e produtivo que reafirma o papel da pecuária brasileira na construção de sistemas sustentáveis e resilientes.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, T. L. D. R.; SILVA, W. L.; BERÇA, A. S.; CARDOSO, A. D. S.; BARBERO, R. P.; ROMANZINI, E. P.; REIS, R. A. **Efeitos da substituição do farelo de algodão por milho seco em grãos de destilaria sobre parâmetros ruminais, desempenho e emissões de metano entérico em touros jovens da raça Nelore criados em pastagens tropicais.** *Animais*, Suíça, v. 11, n. 10, p. 29-59, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNE (ABIEC). *Beef Report 2024: qualidade média*. São Paulo: ABIEC, 2024.

BAHIA, A. S. R. de S. **Caracterização e mapeamento do balanço de gases de efeito estufa na atividade pecuária de corte.** 2024. Relatório de Pós-Doutorado (Zootecnia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2024.

BEAUCHMIN, K. A.; MCGINN, S. M.; PETIT, H. V. **Methane abatement strategies for cattle: Lipid supplementation of diets.** *Canadian Journal of Animal Science*, v. 87, n. 3, p. 319-333, 2007.

BERCHIELLI, T. T.; MESSANA, J. D.; CANESIN, R. C. **Produção de metano entérico em pastagens tropicais.** *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, São Paulo, v. 13, p. 954-968, 2012.

BUENO, M. E. C.; ISSAKOWICZ, J. **Estratégias de mitigação de metano entérico em ruminantes: uma revisão.** In: *Desenvolvimento Rural Sustentável: Novas Perspectivas*. São Paulo: Editora Científica Digital, 2024. Cap. 5, p. 66-86.

CARDOSO, A. S.; BERNDT, A.; LEYTEM, A.; ALVES, B. J.; de CARVALHO, I. D. N.; de BARROS SOARES, L. H.; BODDEY, R. M. **Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use.** *Agricultural Systems*, Amsterdã: Elsevier, v. 143, p. 86-96, 2016.

CARVALHO, I. P. C. D.; FIORENTINI, G.; BERNDT, A.; CASTAGNINO, P. D. S.; MESSANA, J. D.; FRIGHETTO, R. T. S.; BERCHIELLI, T. T. **Performance and methane emissions of Nellore steers grazing tropical pasture supplemented with lipid sources.** *Revista Brasileira de Zootecnia*, Viçosa, v. 45, n. 12, p. 760-767, 2016.

COOKE, R. F.; OLIVEIRA, G. B.; CAVALCANTE, V. H. M.; et al. **Meta-analysis of ionophores supplementation effects on performance, ruminal fermentation, and methane emissions in ruminants.** *Animals (Basel)*, v. 14, n. 2, p. 352, 2024.

CRESPO, A. M.; SOUZA, M. N.; SILVA, M. A. B. **Ciclo do carbono (C) e sistemas agroflorestais na sustentabilidade da produção agrícola: revisão de literatura.** *Ciclo do Carbono e Sustentabilidade na Produção Agropecuária*, São Paulo: Incaper em Revista, v. 13-14, p. 6-19, dez. 2023.

DE ASSIS PIRES, F. P. A.; RAMIREZ, M. A.; GONÇALVES, L. C.; OLIVEIRA, A. F. de; MENEZES, R. A. de; MENEZES, G. L.; ANANIAS, J. V. A. **Estratégias de mitigação da produção de gases do efeito estufa e os sistemas de integração.** In: OLIVEIRA, A. F. de; GONÇALVES, L. C. (org.). *Produção de ruminantes em sistemas integrados*. Belo Horizonte: FEPE, 2021.

DIAS, L. L. R.; KOVACS, T. A. S.; RIBEIRO, M. G. **Mitigação dos gases do efeito estufa em bovinos criados a pasto.** *Revista de Ciência Veterinária e Saúde Pública*, v. 4, p. 169-172, 2017.

DUTHIE, C.-A.; JONES, E.; WALLACE, R. J.; DUTHIE, S.; HASKELL, M. J.; ROSS, D. W.; WATERHOUSE, A.; ROOKE, J. A. **The impact of divergent breed types and diets on methane emissions from beef cattle.** *Animal*, v. 11, n. 10, p. 1768–1778, 2017.

FERRAZ, J. B. S.; SILVA, R. M. O.; BALDI, F.; CARVALHO, M. E.; DE VASCONCELOS SILVA, A.; VENTURINI, G. C.; REIS, M. L.; CAMPOS, G. S.; BUENO, I. C. S.; GONÇALVES, T. M.; ELER, J. P. **Heritability estimates and genome-wide association study of methane emission traits in Nellore cattle.** *Journal of Animal Science*, v. 102, e-skaf182, 2024.

FIGUEIREDO, M. R. P.; PIROVANI, D. B.; BARROS, I.; GODINHO, T. O. **Levantamento de emissões e mitigação de gases de efeito estufa da pecuária bovina no Espírito Santo. Ciclo do Carbono e Sustentabilidade na Produção Agropecuária**, São Paulo: Incaper em Revista, v. 13-14, p. 30-42, dez. 2023.

FLORES-COELLO, G.; HERNÁNDEZ-MEDRANO, J. H.; KU-VERA, J.; DIAZ, D.; SOLORIO-SÁNCHEZ, F. J.; SARABIA-SALGADO, L.; GALINDO, F. **Sistemas silvipastoris intensivos mitigam emissões entéricas de metano do gado. Atmosphere**, v. 14, n. 5, p. 863, 2023.

FONSECA, N. V. B.; CARDOSO, A. S.; HOFFMANN, A.; LEITE, R. G.; FERRARI, A. C.; FERNANDES, M. H. M. R.; REIS, R. A. **Characterization and effects of DDG on the intake and digestibility of finishing bulls in feedlots. Acta Scientiarum. Animal Sciences**, Maringá, v. 43, p. 51-77, 2021.

FONSECA, N. V. B.; CARDOSO, A. S.; BAHIA, A. S. R. de S.; MESSANA, J. D.; VICENTE, E. F.; REIS, R. A. **Taninos aditivos na nutrição de ruminantes: uma alternativa para alcançar a sustentabilidade na produção animal. Sustentabilidade**, v. 15, n. 5, p. 4162, 2023.

FROTA, M. N. L. D.; CARNEIRO, M. S. D. S.; PEREIRA, E. S.; BERNDT, A.; FRIGHETTO, R. T. S.; SAKAMOTO, L. S.; MOREIRA FILHO, M. A.; CUTRIM JUNIOR, J. A. A.; CARVALHO, G. M. C. **Enteric methane in grazing beef cattle under full sun, and in a silvopastoral system in the Amazon. Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 1099-1108, 2017.

GENRO, T.; LAMPERT, V. D. N.; DE LARA, D. M.; VINICIUS, D. N. L. **Análise das emissões de metano entérico do rebanho de bovinos de corte do Rio Grande do Sul. EMBRAPA**, 2023.

GERE, J. I.; RESTOVICH, S. B.; MATTERA, J.; CATTONI, M. I.; ORTIZ-CHURA, A.; POSSE, G.; CERÓN-CUCCHI, M. E. **Emissão de metano entérico em sistemas de pastejo de gado com culturas de cobertura e pastagem de leguminosas e gramíneas. Animals**, v. 14, n. 23, p. 3535, 2024.

GONÇALVES, M. F.; MARTINS, J. M. S.; OLIVEIRA, M. V.; CARVALHO, C. C. M.; ANTUNES, M. M.; FERREIRA, I. C.; PEREIRA, C. F.; OLIVALVES, L. C. **Ionóforos na alimentação de bovinos.** *Veterinária Notícias*, Uberlandia, v. 18, n. 2, p. 2013.

GUAN, H.; WITTENBERG, K. M.; OMINSKI, K. H.; KRAUSE, D. O. **Efficacy of ionophores in cattle diets for mitigation of enteric methane.** *Journal of Animal Science*, v. 84, n. 7, p. 1896–1906, 2006.

GUO, X.; LIU, Y.; JIANG, Y.; YAO, J.; LI, Z. **Ruminal bacterial community successions in response to monensin supplementation in goats.** *Animals (Basel)*, v. 12, n. 17, p. 2291, 2022.

LIMA, A. M. **Influência do manejo da produção animal sobre a emissão de metano em bovinos de corte.** Brasília: EMBRAPA Publication; Ministério da Ciência e Tecnologia, Coordenação Geral de Mudança Global de Clima, 2007.

LØVENDAHL, P.; FRIGGENS, N. C.; LARSEN, M.; HANSEN, A. V.; DIJKSTRA, J.; DE HAAS, Y.; MANZANILLA-PECH, C. I. V. **Genetic (co-)variation of methane emissions, efficiency, and production traits.** *Journal of Dairy Science*, v. 105, n. 12, p. 10563–10577, 2022.

MACHADO, F. S.; PEREIRA, L. G. R.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; LOPES, F. C. F.; CHAVES, A. V.; CAMPOS, M. M.; MORENZ, M. J. F. **Emissões de metano na pecuária: conceitos, métodos de avaliação e estratégias de mitigação.** Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2011.

MAGNANI, E.; SILVA, T. H.; SAKAMOTO, L.; MANELLA, M. Q.; DIAS, F. M. G. N.; MERCADANTE, M. E.; HENRY, D.; MARCATTO, J. O. S.; PAULA, E. M.; BRANCO, R. H. **Tannin-based product in feedlot diet as a strategy to reduce enteric methane emissions of Nellore cattle finished under tropical conditions.** *Translational Animal Science*, v. 7, n. 1, 2023.

MADSEN, J.; BJERG, B. S.; HVELPLUND, T.; WEISBJERG, M. R.; LUND, P. (2010). **Methane and carbon dioxide ratio in excreted air for quantification of methane production in ruminants.** *Livestock Science*, v. 129, p. 223–227.

MARQUES, R. D. S.; COOKE, R. F. **Efeitos dos ionóforos na função ruminal de bovinos de corte.** *Animais*, v. 11, n. 10, p. 2871, 2021.

MEO-FILHO, P.; BERNDT, A.; PEZZOPANE, J. R. M.; PEDROSO, A. F.; BERNARDI, A. C. C.; RODRIGUES, P. H. M.; BUENO, I. C. S.; CORTE, R. R.; OLIVEIRA, P. P. A. **Sistemas de pastagem intensificada podem reduzir as emissões de metano entérico de bovinos de corte no bioma Mata Atlântica?** *Agronomy*, v. 12, n. 11, p. 2738, 2022.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA; SEEG. *Brasil 2045: construindo uma potência ambiental — Adendo ao Volume 3: Bases para a proposta de 2ª NDC para o Brasil (2030-2035): mitigação das emissões de metano.* Nota técnica. Brasília: Observatório do Clima / SEEG, 2025.

OLIVEIRA, A. F.; LANA, Â. M. Q.; GONÇALVES, L. C.; RAMIREZ, M. A.; SOUSA, P. G.; PIRES, F. P. A. A.; MENEZES, R. A.; MENEZES, G. L. **Valor nutritivo das pastagens em sistemas de integração pecuária-floresta.** In: OLIVEIRA, A. F.; GONÇALVES, L. C. *Produção de ruminantes em sistemas integrados*. 1. ed. Belo Horizonte: FEPE, 2021.

OLIVEIRA, V. S.; NETO, J. A. S.; VALENÇA, R. L.; SANTOS, A. C. P. **Estratégias para mitigar a produção de metano entérico.** *Veterinária. Notícias*, Uberlândia, v. 23, n. 1, p. 39-70, jan./abr. 2017.

PALANGI, V.; LACKNER, M. **Management of Enteric Methane Emissions in Ruminants Using Feed Additives: A Review.** *Animals*, v. 12, p. 3452, 2022.

PATRA, A. K.; LALHRIATPUIA, S. **Enteric methane emissions and animal performance in dairy and beef cattle.** *Animal Nutrition*, v. 8, n. 3, p. 335–350, 2022.

PEREIRA, L. G. R. **Métodos de avaliação e estratégias de mitigação de metano entérico em ruminantes.** *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, v. 26, p. 264-277, 2013.

PEREIRA, L. G. R.; AZEVÊDO, J. A. G.; MACHADO, F. S.; CAMPOS, M. M.; JUNIOR, R. G.; TOMICH, T. M.; CARVALHO, B. C. **Emissão de gases de efeito estufa na pecuária:**

uma análise ambiental e conceitual. In: FERNANDES, E. N.; MARTINS, C. E.; NOBRE, M. M.; NOVAES, E.; LOPES, F. C. F.; MENDONÇA, L. C.; PEREIRA, L. G. R.; MACHADO, M. A.; TEIXEIRA, S. R.; TALONE, A.; SILVA, F. H.; FIORINI, J. P.; MARTINS, M. C., orgs. *Desafios para a sustentabilidade ambiental, social e econômica da cadeia produtiva do leite*. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2015. Cap. 6, p. 101-130.

PRIMAVESI, O.; FRIGHETTO, R. T. S.; PEDREIRA, M. S.; LIMA, M. A.; BERCHIELLI, T. T.; BARBOSA, P. F. **Metano entérico de bovinos leiteiros em condições tropicais brasileiras.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, p. 277–283, 2004..

RANGEL, A. H. N.; LEONEL, F. P.; SIMPLÍCIO, A. A.; JÚNIOR, A. G. M. **Utilização de ionóforos na produção de ruminantes.** *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, Campina Grande, v. 8, n. 2, 2008.

RIVERA, A. R.; BERCHIELLI, T. T.; MESSANA, J. D.; VELASQUEZ, P. T.; FRANCO, A. V. M.; FERNANDES, L. B. **Fermentação ruminal e produção de metano em bovinos alimentados com feno de capim-tifton 85 e concentrado com aditivos.** *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 39, p. 617-624, 2010.

RUGGIERI, A. C.; CARDOSO, A. D. S. **Balanço de carbono em sistemas de produção animal: fontes de emissão e opções de mitigação.** Calgary: Archivos Latinoamericanos de Producción Animal, v. 25, p. 1-2, 2017.

SIQUEIRA, F.; CAVIGLIONI, M. de B. C. **Metagenômica, nanotecnologia e nutrição animal: alternativas para o uso de antibióticos e mitigação de gases de efeito estufa.** Campo Grande – MS: Embrapa Gado de Corte, 2021. 102 p.

SOUSA, M. P.; PIRES, A. J. V.; SILVEIRA, R. B.; PUBLIO, P. P. P.; FIGUEIREDO, G. C.; CRUZ, N. T. **Crop, Livestock and Forestry Integration Systems.** *Brazilian Journal of Science*, São Paulo, v. 1, n. 10, p. 53–63, 2022.

SOSA-PÉREZ, G.; LÓPEZ-ORTIZ, S.; PÉREZ-HERNÁNDEZ, P.; VAQUERA-HUERTA, H.; GALVÁN, M. M. C.; GALLEGOS-SÁNCHEZ, J. **Degradabilidade da matéria seca e da**

proteína bruta de frutos de *Cloroleucon mangense* e *Acacia cochliacantha* em carneiros. Brasília: *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 58(AA), 2024.

STELLA, L. A.; ZUBIETA, A. S.; GOMES, B. C. K. **Estratégia do uso de cereais na redução da produção de metano entérico em ruminantes.** *Nutritime*, v. 17, 2020.

UNFPA. **8 bilhões de vidas, infinitas possibilidades: em defesa de direitos e escolhas.** Relatório Situação da População Mundial 2023. UNFPA, 2023.

VALINOTE, A. C.; NOGUEIRA FILHO, J. C. M.; LEME, P. R.; SILVA, S. D. L.; CUNHA, J. A. **Fontes de lipídeos e monensina na alimentação de novilhos Nelore e sua relação com a população de protozoários ciliados do rúmen.** São Paulo: *Revista Brasileira de Zootecnia*, 2005. Cap. 34, p. 1418-1423.

VECHI, N. T.; MELLQVIST, J.; SCHEUTZ, C. **Quantificação de emissões de metano de fazendas de gado, utilizando o método de dispersão de gás traçador.** *Agricultura, Ecossistemas e Meio Ambiente*, v. 330, p. 107885, 2022.

VIEIRA, L. C.; VIEIRA, D. J. C.; GRAZZIOTIN, R. C. B.; POLETTI, G.; VIEGAS, J.; PEROTTONI, J.; BERMUDEZ, R. F. **Utilização de DDG e WDG na nutrição de ruminantes.** In: COSTA, E. J. X. (Org.). *Zootecnia de precisão: desafios e aplicações*. São Paulo: Editora Científica Digital, 2021. Cap. 1, p. 151-169.

XIE, X.; CAO, Y.; LI, Q.; LI, Q.; YANG, X.; WANG, R.; ZHANG, X.; TAN, Z.; LIN, B.; WANG, M. **Mitigating enteric methane emissions: An overview of methanogenesis inhibitors and future prospects.** *Animal Nutrition*, v. 21, n. 4, p. 84-96, 2025.

ZHANG, X.; AMER, P. R.; JENKINS, G. M.; SISE, J. A.; SANTOS, B.; QUINTON, C. **Predição dos efeitos dos índices de seleção de laticínios nas emissões de metano.** Champaign, IL: *Journal of Dairy Science*, v. 102, p. 11153-11168, 2019.