



Métodos para mensuração de metano entérico em ruminantes: uma revisão

Indiara Patricia Martins LIESENFELD ^{*1} , Silvia Cheles BENTO ² 

¹ Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop, MT, Brasil.

² Departamento de Zootecnia, Universidade Federal da Bahia, Campus Ondina, Salvador, BA, Brasil.

*E-mail: indiara_martins@yahoo.com.br

Submetido em: 14/02/2026; Aceito em: 03/08/2026; Publicado em: 02/09/2026.

RESUMO: Este artigo revisa os principais métodos utilizados para mensurar a emissão de metano entérico (CH₄) em ruminantes, destacando sua importância ambiental como gás de efeito estufa e sua origem como subproduto da fermentação ruminal. São abordadas as principais rotas bioquímicas da metanogênese, com ênfase na atuação das arqueas metanogênicas e na necessidade de remoção do hidrogênio para a manutenção do equilíbrio redox no rúmen. O estudo compara as vantagens, limitações e aplicabilidade dos principais métodos de quantificação de CH₄, incluindo câmaras respirométricas, o sistema GreenFeed, a técnica do gás traçador SF₆, máscaras respirométricas, técnicas in vitro e modelos matemáticos. Adicionalmente, foi realizada uma meta-análise com base em sete estudos, cujos resultados indicaram estimativas semelhantes das emissões de metano entérico entre as câmaras respirométricas, o sistema GreenFeed e a técnica do SF₆. Também são discutidas estratégias nutricionais para a mitigação das emissões, incluindo a manipulação da dieta, considerado uma das alternativas mais eficientes. Além disso, destaca-se o papel do melhoramento genético na redução sustentável das emissões, dada a herdabilidade moderada e a variabilidade individual na produção de CH₄. Por fim, modelos preditivos, especialmente o NS Dairy Cattle, são apresentados como ferramentas práticas para estimar as emissões de metano entérico e auxiliar na avaliação e no desenvolvimento de estratégias de mitigação.

Palavras-chave: fermentação entérica; gases de efeito estufa; mitigação de metano.

Methods for measuring enteric methane in ruminants: a review

ABSTRACT: This article reviews the main methods used to measure enteric methane (CH₄) emissions in ruminants, highlighting their environmental importance as a greenhouse gas and their origin as a byproduct of ruminal fermentation. The main biochemical pathways of methanogenesis are addressed, with emphasis on the activity of methanogenic archaea and the need for hydrogen removal to maintain redox balance in the rumen. The study compares the advantages, limitations, and applicability of the main methods for CH₄ quantification, including respiration chambers, the GreenFeed system, the SF₆ tracer gas technique, respiration masks, in vitro techniques, and mathematical models. Additionally, a meta-analysis based on seven studies was conducted, and its results indicated similar estimates of enteric methane emissions among respiration chambers, the GreenFeed system, and the SF₆ technique. Nutritional strategies for mitigating emissions are also discussed, considered one of the most effective alternatives. Furthermore, the role of genetic improvement in the sustainable reduction of emissions is highlighted, considering the moderate heritability and individual variability in CH₄ production. Finally, predictive models, particularly for dairy cattle, are presented as practical tools for estimating enteric methane emissions and supporting the evaluation and development of mitigation strategies.

Keywords: enteric fermentation; greenhouse gases; methane mitigation.

1. INTRODUÇÃO

O metano (CH₄) é um dos principais gases de efeito estufa (GEE) associados às atividades agropecuárias e contribui significativamente para as mudanças climáticas devido ao seu elevado potencial de aquecimento global. Em um horizonte de 100 anos, o potencial de aquecimento global do CH₄ é aproximadamente 28 vezes maior do que o do dióxido de carbono (CO₂), conforme os valores estabelecidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2019). Embora apresente concentração inferior à do CO₂, o CH₄ possui maior eficiência na retenção de radiação

infravermelha, o que torna a redução de suas emissões uma estratégia relevante para o enfrentamento das mudanças climáticas.

Entre as principais fontes de emissão de CH₄, a pecuária destaca-se pela fermentação entérica de ruminantes, especialmente em países com grandes rebanhos, como o Brasil. Nos ruminantes, o CH₄ é produzido principalmente no rúmen, como resultado da atividade de microrganismos durante a fermentação anaeróbia dos carboidratos da dieta. Nesse processo, a degradação dos substratos alimentares resulta na produção de ácidos graxos voláteis, dióxido de

carbono (CO₂) e hidrogênio (H₂), sendo este último utilizado pelas arqueas metanogênicas como substrato para a formação de CH₄. A remoção do H₂ é fundamental para a manutenção do equilíbrio redox do ambiente ruminal e para a continuidade de determinadas vias fermentativas, estabelecendo uma relação direta entre a metanogênese, o metabolismo microbiano e a utilização dos nutrientes pelo animal. Dessa forma, a produção de CH₄ não é apenas uma questão ambiental, mas também uma fonte de perda de energia potencialmente aproveitável pelo animal.

A magnitude das emissões de CH₄ entérico é influenciada principalmente pela espécie e pela categoria animal, bem como pelo sistema de criação e pelo manejo nutricional. Consequentemente, a mensuração precisa dessas emissões é fundamental para compreender os fatores que regulam a metanogênese, avaliar o impacto ambiental dos sistemas de produção e determinar a eficiência de estratégias de mitigação. No entanto, a quantificação do CH₄ entérico apresenta desafios metodológicos relacionados à precisão das estimativas, ao custo dos equipamentos, à necessidade de infraestrutura especializada, ao grau de interferência no comportamento natural dos animais e à capacidade de representar condições reais de produção.

Diversos métodos têm sido desenvolvidos para mensurar ou estimar as emissões de CH₄ em ruminantes, com diferentes níveis de precisão, complexidade, custo e aplicabilidade. Entre eles, destacam-se as câmaras respirométricas, o sistema GreenFeed, a técnica do gás traçador hexafluoreto de enxofre (SF₆), as máscaras respirométricas, as técnicas *in vitro* e os modelos matemáticos. A comparação entre essas abordagens é fundamental para avaliar a confiabilidade e a comparabilidade dos resultados, uma vez que fatores como a metodologia, o ambiente experimental, a frequência de amostragem e as características dos animais podem influenciar as estimativas obtidas.

Diante desse cenário, esta revisão tem como objetivo abordar os principais métodos utilizados para a mensuração e predição das emissões de metano entérico em ruminantes, discutindo suas vantagens, limitações, precisão, custos, grau de invasividade e aplicabilidade em diferentes condições experimentais e de produção. Além disso, busca-se comparar as estimativas obtidas pelos principais métodos de mensuração por meio de uma meta-análise, bem como discutir as principais estratégias nutricionais e genéticas de mitigação, além do uso de modelos preditivos como ferramentas para a avaliação e redução das emissões de CH₄ na produção de ruminantes.

2. METODOLOGIA DA REVISÃO

Este artigo foi desenvolvido como uma revisão narrativa da literatura, com base em estudos relacionados à formação do CH₄ entérico, aos métodos de mensuração direta e indireta, às estratégias nutricionais de mitigação e ao melhoramento genético. A seleção e a organização dos estudos priorizaram trabalhos que permitissem descrever o princípio de funcionamento das principais técnicas, bem como suas vantagens, limitações e respectivos contextos de aplicação. Por se tratar de uma revisão narrativa, não foi estabelecido um protocolo sistemático de busca ou seleção dos estudos, não havendo, portanto, pretensão de exaustividade nem de reprodução de um processo formal de revisão sistemática.

Como complemento à síntese qualitativa, foi realizada uma comparação quantitativa das estimativas de emissão de CH₄ entérico obtidas por diferentes métodos de mensuração. Para essa análise, foram consideradas 16 médias de tratamentos provenientes de sete estudos que compararam a câmara respirométrica, o sistema GreenFeed e a técnica do gás traçador SF₆. As médias de emissão de CH₄ entérico foram analisadas por meio de um modelo de efeitos mistos, com o método de mensuração como efeito fixo e o estudo como efeito aleatório, para captar a variabilidade entre os estudos. As estimativas foram ponderadas pelo inverso do erro-padrão da média e as diferenças entre os métodos foram avaliadas pelo teste t.

3. Metano entérico: características e importância

O metano (CH₄) é um hidrocarboneto saturado de cadeia simples, constituído por um átomo de carbono covalentemente ligado a quatro átomos de hidrogênio. Em condições ambientais, apresenta-se como um gás incolor e inodoro em sua forma pura, com ponto de ebulição de -161,5 °C e densidade inferior à do ar. É um composto altamente inflamável, embora essas características físico-químicas tenham menor relevância no contexto da produção animal. O CH₄ pode ser produzido por fontes naturais, como zonas úmidas e o trato gastrointestinal de animais ruminantes, e por atividades humanas, incluindo a exploração e utilização de combustíveis fósseis, a produção pecuária, os aterros sanitários e o tratamento de águas residuais (COTTLE et al., 2011; SAUNOIS et al., 2020; PIROLA; ANDRIGUETTO, 2022). Entre essas fontes, a fermentação entérica dos ruminantes tem particular importância para o setor agropecuário, devido à elevada contribuição dos rebanhos para as emissões de CH₄.

Nos ruminantes, a produção de CH₄ ocorre principalmente no rúmen, como consequência da fermentação anaeróbia dos carboidratos da dieta. O ambiente ruminal abriga uma complexa comunidade microbiana, composta principalmente por bactérias, protozoários, fungos e arqueas metanogênicas, que atuam de forma integrada na degradação dos componentes da dieta. Durante a fermentação, especialmente dos carboidratos estruturais, como celulose e hemicelulose, são produzidos ácidos graxos voláteis (AGVs), como o acetato, propionato e butirato, além de dióxido de carbono (CO₂) e hidrogênio molecular (H₂). Os AGVs constituem importantes fontes de energia para o hospedeiro, enquanto o CO₂ e o H₂ participam diretamente das reações da metanogênese (Martin et al., 2010). Estima-se que entre 87% e 90% do CH₄ entérico seja produzido no rúmen, enquanto a fração restante é formada principalmente no intestino grosso (Dini et al., 2012). A maior parte do CH₄ produzido no rúmen é eliminada por eructações, e uma pequena parcela é absorvida e, posteriormente, eliminada pela respiração. No intestino posterior, o CH₄ pode ser eliminado tanto pelas vias pulmonar quanto retal.

A principal via de produção de CH₄ no rúmen é a metanogênese hidrogenotrófica, na qual as arqueas metanogênicas utilizam H₂ para reduzir o CO₂, conforme a reação: CO₂ + 4H₂ → CH₄ + 2H₂O. A remoção contínua do H₂ pelas arqueas contribui para a manutenção de sua baixa pressão parcial no rúmen, favorecendo determinadas reações fermentativas e o crescimento de microrganismos que produzem os principais AGVs. Dessa maneira, a metanogênese apresenta uma relação estreita com a dinâmica

da fermentação ruminal, uma vez que o consumo de H_2 pelas arqueas contribui para o equilíbrio das reações envolvidas na degradação dos nutrientes (MARTIN et al., 2010; COTTLE et al., 2011). Entretanto, essa atividade também representa uma perda de energia para o animal, uma vez que parte da energia contida nos substratos fermentados é destinada à formação e à posterior eliminação de CH_4 .

As arqueas metanogênicas pertencem a um domínio microbiano distinto das bactérias e apresentam características metabólicas específicas que lhes permitem utilizar diferentes compostos como substratos para a produção de CH_4 . No trato gastrointestinal dos ruminantes, esses microrganismos podem estar associados a protozoários ciliados ou aderidos à superfície de bactérias e de partículas alimentares. Entre os principais grupos de arqueas metanogênicas encontrados no rúmen e no intestino grosso estão representantes dos gêneros *Methanobrevibacter*, *Methanomicrobium*, *Methanosarcina* e *Methanobacterium*, com destaque para as espécies do gênero *Methanobrevibacter*, frequentemente identificadas como importantes produtoras de CH_4 no rúmen (HUNGATE et al., 1970).

Embora o H_2 seja o principal doador de elétrons utilizado na metanogênese, as arqueas podem utilizar outros substratos, incluindo, metanol, acetato e compostos metilados, como mono-, di- e trimetilaminas. A contribuição de cada substrato depende da comunidade metanogênica presente e das condições do ambiente ruminal. De acordo com Hungate et al. (1970), o H_2 está associado à maior parte da metanogênese, representando cerca de 80% da produção. Esses valores evidenciam a importância do metabolismo do H_2 para a formação de CH_4 no rúmen.

A formação de H_2 durante a fermentação está diretamente relacionada à natureza do substrato. A decomposição de carboidratos fibrosos tende a favorecer a produção de acetato e butirato, cujas vias metabólicas liberam H_2 . Já a fermentação de carboidratos não fibrosos, como os amidos, promove maior produção de propionato, cuja formação consome H_2 , reduzindo a disponibilidade de H_2 para a metanogênese (Martin et al., 2010). Dessa forma, alterações na proporção de AGVs produzidos durante a fermentação podem modificar a quantidade de H_2 disponível e, consequentemente, influenciar a produção de CH_4 no rúmen.

Embora a metanogênese desempenhe função importante na manutenção das condições adequadas para a fermentação ruminal, a formação de CH_4 representa, simultaneamente, uma perda de energia para o animal e uma fonte relevante de emissão de GEE. Dessa forma, compreender os mecanismos envolvidos na produção de CH_4 e os fatores que regulam sua formação é fundamental para o desenvolvimento de estratégias capazes de reduzir suas emissões sem comprometer a eficiência da fermentação nem o desempenho dos ruminantes.

4. Métodos para quantificação da emissão de metano entérico

A quantificação da emissão de metano entérico em ruminantes é essencial para a compreensão dos fluxos de GEE nos sistemas pecuários, bem como para o desenvolvimento e a avaliação de estratégias de mitigação. Atualmente, diversas metodologias estão disponíveis para estimar a produção de CH_4 , variando em precisão, custo,

invasividade, aplicabilidade prática e contexto experimental ou de campo. Um sumário das características dos métodos de mensuração direta e indireta da emissão de metano entérico está apresentado na Tabela 1.

4.1. Método do gás traçador (SF_6)

O método do gás traçador com hexafluoreto de enxofre (SF_6) é amplamente utilizado para estimar a emissão de metano entérico em ruminantes em condições de campo. Trata-se de uma técnica não invasiva, que permite a mensuração individual das emissões em sistemas comerciais, com bom equilíbrio entre custo e precisão (JOHNSON; JOHNSON, 1995; ODAI et al., 2010). Nesse método, um permeador contendo SF_6 é introduzido no rúmen do animal. O traçador é liberado a uma taxa constante e calibrada, geralmente após incubação a temperatura controlada. O gás exalado é coletado por um tubo capilar próximo às narinas, que o direciona para um reservatório de amostra por até 24 horas (RICCI et al., 2013). Após a coleta, as amostras são analisadas por cromatografia gasosa, a partir da qual se determina a relação entre as concentrações de CH_4 e SF_6 . A partir dessa proporção e da taxa de liberação do traçador, calcula-se a emissão diária individual de metano (JOHNSON; JOHNSON, 1995; STORM et al., 2012).

O SF_6 é um gás sintético, incolor, inodoro e não inflamável, utilizado como isolante dielétrico e no monitoramento de vazamentos industriais (MOMBACH et al., 2018). Sua escolha baseia-se no comportamento físico semelhante ao do CH_4 no fluxo expirado e na ausência de interferência na fisiologia animal. Apesar de ser considerado um padrão de referência em campo, o método requer equipamentos especializados (tubos de coleta, válvulas, capilares) e um laboratório equipado para análise cromatográfica (GRAINGER et al., 2007; DEIGHTON et al., 2014). Também são necessárias a calibração rigorosa dos permeadores e os cuidados para evitar a contaminação cruzada (STORM et al., 2012). Mesmo com essas limitações, o método SF_6 continua sendo uma das ferramentas mais validadas para quantificar metano entérico em sistemas de produção comercial, oferecendo versatilidade em pastagens e repetibilidade de medições sem confinamento intensivo.

4.2. Método GreenFeed

O sistema GreenFeed® (Automated Head-Chamber System – AHCS) é uma tecnologia automatizada desenvolvida para quantificar as emissões entéricas de gases, como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), oxigênio (O_2) e hidrogênio (H_2), em ruminantes (HAMMOND et al., 2016). O método não invasivo, é aplicável em sistemas de produção a pasto ou confinados, e permite a mensuração individual das emissões gasosas dos animais (BOSHER et al., 2024).

O funcionamento do sistema baseia-se na atração voluntária dos animais ao equipamento, estimulada pela oferta de pequenas porções de ração concentrada (Huhtanen et al., 2015). Ao inserir a cabeça no alimentador, o animal é identificado eletronicamente por meio de um transponder. Durante esse período, o ar expirado é coletado por ventilação forçada e direcionado a sensores infravermelhos que medem, em tempo real, as concentrações dos gases expirados (TEDESCHI et al., 2022). As medições ocorrem diversas vezes ao dia, o que permite capturar a variabilidade intradiária na produção de CH_4 (JONKER et al., 2016). Os dados são

registrados automaticamente e armazenados em um banco de dados remoto para posterior análise estatística (BOSHER et al., 2024).

Entre as principais vantagens do GreenFeed estão a automação da coleta de dados, o baixo estresse animal, a portabilidade e a possibilidade de uso em diferentes sistemas de produção (Hammond et al., 2016). O sistema tem sido amplamente adotado em pesquisas voltadas à avaliação de aditivos alimentares, de estratégias nutricionais e de genética animal (TEDESCHI et al., 2022). Contudo, o método apresenta algumas limitações. Há necessidade de um período de adaptação dos animais ao equipamento e de infraestrutura elétrica e espacial adequadas (HAMMOND et al., 2016). Além disso, o custo de aquisição e manutenção é elevado, e os dados podem apresentar viés comportamental caso haja baixa frequência de visitação dos animais ao sistema (Huhtanen et al., 2015).

4.3. Método das câmaras respirométricas

As câmaras respirométricas são amplamente reconhecidas como o padrão ouro para a quantificação precisa das emissões entéricas de metano (CH_4) em ruminantes (Storm et al., 2012; Hammond et al., 2016). Esse sistema envolve o alojamento individual dos animais em câmaras herméticas, em ambiente confinado e controlado, permitindo o monitoramento contínuo e altamente sensível das trocas gasosas.

A técnica baseia-se na medição da concentração de gases no ar inspirado e expirado, especialmente CH_4 , CO_2 e O_2 , em conjunto com a taxa de fluxo de ar forçada, fornecida por sistemas de ventilação calibrados (TEDESCHI et al., 2022). As diferenças entre as concentrações de ar de entrada e de saída permitem o cálculo exato das emissões respiratórias (HUHTANEN et al., 2015). As câmaras geralmente são climatizadas e isoladas, com controle automatizado de temperatura, umidade e ventilação. Softwares especializados registram continuamente o comportamento respiratório e parâmetros ambientais, assegurando alta resolução temporal dos dados (HAMMOND et al., 2016; BOSHER et al., 2024).

Entre as principais vantagens do método, destacam-se a elevada acurácia, a baixa variabilidade experimental e a possibilidade de mensurar simultaneamente outros parâmetros fisiológicos, como o consumo alimentar e a produção de calor (STORM et al., 2012). Por essas razões, as câmaras são amplamente utilizadas em ensaios de curta duração com delineamentos controlados (COTTLE et al., 2011). No entanto, limitações importantes devem ser consideradas. O confinamento prolongado pode alterar o comportamento ingestivo, reduzir a atividade física e modificar o padrão de fermentação ruminal, comprometendo a representatividade das medições em relação às condições de campo (DEIGHTON et al., 2014; BOSHER et al., 2024). Além disso, trata-se de um sistema oneroso, que demanda infraestrutura sofisticada, manutenção elevada e baixa capacidade de avaliação simultânea de animais, o que restringe seu uso a estudos experimentais altamente controlados e com poucos indivíduos por ciclo (HAMMOND et al., 2016).

4.4. Método da máscara (Face Mask System)

O sistema de máscara, conhecido como Face Mask System, é uma técnica utilizada para a mensuração direta do metano entérico por meio da coleta do ar expirado de ruminantes. O método envolve o uso de máscaras ajustadas

à cabeça dos animais, acopladas a sensores de fluxo e analisadores de gases que determinam a concentração e o volume de CH_4 exalado (WATTIAUX et al., 2019). As máscaras são projetadas para capturar o ar expirado e o eructado, permitindo medições pontuais de alta precisão. A análise da emissão baseia-se na combinação entre a taxa de fluxo respiratório e a concentração de metano, geralmente registrada por meio de bombas de amostragem e medidores de volume calibrados, que armazenam os dados para análise posterior (DEIGHTON et al., 2014).

Existem diferentes modelos de máscaras, variando quanto ao tamanho, grau de vedação e tipo de filtro, o que permite a adaptação às características anatômicas dos animais e ao tipo de experimento. A adequação do modelo, bem como a calibração e o controle de vazamentos dos sensores, são fundamentais para garantir a acurácia das medições e a segurança operacional (PIROLA; ANDRIGUETTO, 2022).

Entre as principais vantagens do método estão sua portabilidade, o baixo custo relativo em comparação com câmaras respirométricas e a possibilidade de aplicação em ensaios de curta duração e em estudos nutricionais controlados (HAMMOND et al., 2016). A técnica é especialmente útil para testes exploratórios, como a avaliação de ingredientes dietéticos ou de efeitos agudos de aditivos (WATTIAUX et al., 2019). No entanto, o uso de máscaras pode causar desconforto e interferir no comportamento animal, especialmente em períodos prolongados. Além disso, por se tratar de um método pontual, não permite o monitoramento contínuo das emissões, o que limita sua representatividade quanto à variação diurna da produção de CH_4 (BOSHER et al., 2024).

4.5. Método de produção de gases in vitro

A técnica de produção de gases in vitro é amplamente empregada para estimar o potencial fermentativo e metanogênico de diferentes alimentos em ruminantes. Trata-se de um método laboratorial que simula as condições anaeróbias do rúmen, permitindo investigar a produção de metano (CH_4) durante a fermentação ruminal controlada (RAMIN; HUHTANEN, 2012). O sistema consiste na incubação de amostras de alimentos em frascos herméticos contendo fluido ruminal fresco (obtido de animais canulados) e soluções tampão artificiais, a uma temperatura controlada (geralmente 39 °C). A fermentação é conduzida por um período determinado, durante o qual os gases produzidos (CH_4 , CO_2 e H_2) são coletados e quantificados, geralmente por meio do deslocamento de volume (sistema de gás-pistão) ou de cromatografia gasosa. A formação de metano in vitro ocorre tanto pela fermentação de hexoses e pentoses quanto pela reação de neutralização de ácidos graxos voláteis (AGVs) com o bicarbonato presente na solução de incubação, o que simula a função tampão da saliva. O volume de CH_4 gerado reflete o potencial metanogênico da dieta testada, e os dados obtidos servem de base para a formulação de estratégias nutricionais de mitigação (DANIELSSON et al., 2017).

Entre as principais vantagens do método estão a simplicidade operacional, o baixo custo, a alta reprodutibilidade e a possibilidade de realizar múltiplas repetições simultâneas, o que o torna ideal para triagem de ingredientes, aditivos ou formulações dietéticas com menor impacto ambiental (COTTLE et al., 2011; PIROLA; ANDRIGUETTO, 2022). Apesar de não representar completamente as condições in vivo, a técnica in vitro

fornece previsibilidade valiosa do comportamento fermentativo de forragens, subprodutos ou concentrados, bem como para a triagem de aditivos com potencial para reduzir as emissões de metano entérico, para posterior confirmação em ensaios in vivo.

4.6. Modelos preditivos matemáticos

Modelos matemáticos representam uma alternativa viável para estimar as emissões de metano entérico de ruminantes, especialmente diante das dificuldades operacionais e dos custos elevados associados aos métodos de mensuração direta apresentados anteriormente. Desde a década de 1930 diversos modelos vêm sendo propostos com o objetivo de prever a emissão do gás com base em variáveis alimentares, produtivas e/ou fisiológicas. Atualmente, há mais de 40 equações preditivas disponíveis, com variações de complexidade, precisão e aplicabilidade prática (DONADIA et al., 2023).

A maioria dos modelos disponíveis é de base empírica, ou seja, fundamentados em análises estatísticas de grandes bases de dados experimentais. A capacidade preditiva desses modelos depende diretamente da qualidade, abrangência e variabilidade dos dados originais utilizados em sua formulação (DONADIA et al., 2023). Além disso, muitos exigem variáveis que não são rotineiramente mensuradas em propriedades leiteiras, como a digestibilidade aparente ou a composição detalhada da dieta (HUHTANEN et al., 2015).

Appuhamy et al. (2016) compararam o desempenho de 40 modelos preditivos de emissão de metano em vacas leiteiras e recomendaram o modelo de Nielsen et al. (2013) para a América do Norte e o de Yan et al. (2000) para a Europa. Esses modelos utilizam variáveis relacionadas ao consumo de matéria seca ao teor de fibra da dieta, à produção de leite e ao teor de gordura do leite. Entretanto, a exigência de informações específicas sobre a dieta ainda constitui um entrave à sua ampla adoção, especialmente em sistemas com baixo nível de monitoramento nutricional.

Assim, o desenvolvimento de modelos simplificados e robustos, baseados em variáveis de fácil obtenção nas fazendas, tais como peso vivo, produção diária de leite e consumo estimado, podem ampliar a aplicação prática das ferramentas de predição de CH₄ na pecuária leiteira. Neste sentido, o sistema NS Dairy Cattle, um modelo de exigências nutricionais e de avaliação de dietas para bovinos de leite, apresenta-se como uma ferramenta promissora. Seu submodelo de metano foi elaborado com base em emissões representativas de diferentes sistemas de alimentação e de diferentes grupos genéticos. Além disso, apresenta opções baseadas em variáveis de fácil acesso, ampliando sua aplicabilidade em campo e seu potencial de uso em inventários de GEE nos níveis animal, de rebanho, regional, nacional e internacional (OLIVEIRA, 2024).

Em termos de aplicação, modelos baseados no consumo de matéria seca tendem a oferecer maior acurácia, mas dependem de registros que nem sempre estão disponíveis em propriedades comerciais. Os modelos sem consumo de matéria seca, embora mais simples, ampliam a utilização em fazendas com menor nível de monitoramento; já os modelos que incorporam informações da dieta são mais adequados a estudos experimentais e avaliações nutricionais detalhadas. Assim, a escolha deve equilibrar a disponibilidade de dados com a precisão necessária.

5. Comparação entre métodos de mensuração direta da emissão de metano entérico

Na Figura 1 estão apresentadas uma comparação dos valores de emissão de metano entérico (g/animal/d) em bovinos obtidos pelos três principais métodos de mensuração direta (câmara respirométrica, GreenFeed e SF₆), a partir de uma análise de 16 médias de tratamentos reportadas em sete estudos em que os métodos foram comparados (Hristov et al., 2016; Jonker et al., 2016; Oss et al., 2016; Alemu et al., 2017; Rischewski et al., 2017; Doreau et al., 2018; e Ma et al., 2024). As comparações das médias de mínimos quadrados (MMQ) da emissão de metano entérico foram feitas em modelo misto, considerando o estudo como efeito aleatório e o método como efeito fixo, por meio do teste t, e ponderadas pelo inverso do erro padrão da média.

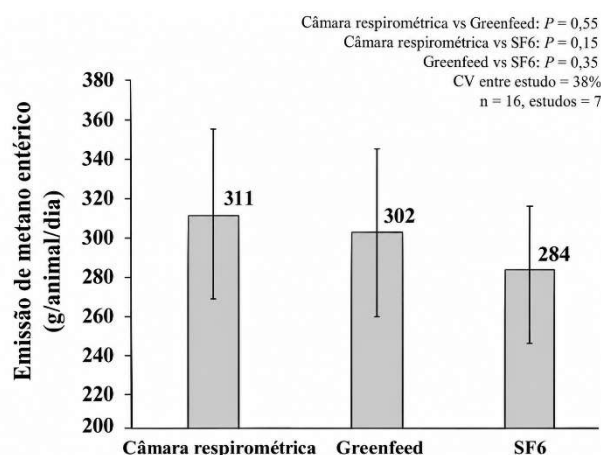


Figura 1. Meta-análise da comparação das médias de mínimos quadrados (MMQ) estimadas da emissão de metano entérico obtidas por meio de câmaras respirométricas, do GreenFeed e do gás traçador SF₆.

Figure 1. Meta-analysis comparing estimated least-squares means (LSM) of enteric methane emissions obtained using respiration chambers, GreenFeed, and the SF₆ tracer gas technique.

As MMQ das EME obtidas pelas três técnicas foram semelhantes ($P > 0,05$). Isso demonstra que os métodos apresentaram estimativas equivalentes da produção diária de metano. Esse resultado corrobora amplamente a literatura, que já descreve alta concordância entre métodos de mensuração, especialmente quando conduzidos sob condições experimentais padronizadas. Segundo Hristov (2024), a Câmara Respirométrica é o padrão-ouro devido ao controle total do ambiente, o que tende a gerar valores um pouco mais elevados.

Da mesma forma, pesquisas que comparam GreenFeed e SF₆ frequentemente relatam diferenças numéricas pequenas, porém sem significância estatística, o que reflete exatamente o padrão observado neste estudo (Figura 1). Hammond et al. (2016) demonstraram que o SF₆ tende a apresentar valores ligeiramente menores devido à variabilidade associada ao marcador traçador, mas, ainda assim, fornece estimativas comparáveis quando aplicado de maneira adequada.

A presença de barras de erro relativamente amplas (Figura 1) indica considerável variabilidade entre animais, o que é consistente com os achados de Huhtanen et al. (2015) e Jonker et al. (2016), que destacam que o “efeito animal” (diferenças na microbiota, ingestão, comportamento alimentar e eficiência digestiva) é uma das principais fontes de variação nas mensurações de CH₄, independentemente do

método empregado. Este comportamento exige dos pesquisadores atenção ao dimensionamento adequado do número de repetições por unidade de experimentação para a obtenção de um poder de teste adequado.

6. Estratégias nutricionais e melhoramento genético para mitigação do metano entérico

Existem estratégias nutricionais relativamente simples para reduzir a produção de substratos disponíveis para a metanogênese no rúmen, por meio de manipulações dietéticas que favorecem rotas alternativas de fermentação e, paralelamente, do uso de aditivos que interferem no processo de metanogênese. Para Hristov (2024), essas abordagens nutricionais, divididas em manipulação da dieta e no uso de aditivos alimentares, apresentam potencial expressivo para mitigar as emissões entéricas de metano.

Na manipulação dietética, recomenda-se o uso de alimentos de alta digestibilidade, forragens de qualidade superior e leguminosas, o que favorece a produção de propionato, que atua como sumidouro de hidrogênio. A inclusão de gorduras e óleos também pode reduzir as emissões por efeito direto sobre as arqueas metanogênicas, pela alteração da cinética ruminal e pela menor produção de hidrogênio. Em estudo realizado por Van Wyngaard et al (2018), o aumento da suplementação com concentrado em vacas leiteiras mantidas em pastagens de baixa qualidade, com elevada fração fibrosa, reduziu a intensidade de emissão de metano por quilograma de produto. Embora o volume absoluto de CH₄ por vaca possa aumentar, a produção de leite cresce em proporção superior, reduzindo a emissão por unidade produzida. Fisiologicamente, a maior proporção de concentrado desloca a fermentação para a produção de propionato, que compete pelo hidrogênio disponível e reduz a produção de metano.

De acordo com Kreuzer (2025), a incorporação de aditivos, como saponinas, taninos, ionóforos, macroalgas marinhas e óleos ou extratos vegetais, apresenta-se como uma estratégia promissora para modular a microbiota ruminal e redirecionar o hidrogênio (H₂). Esses compostos podem afetar as arqueas metanogênicas e direcionar o H₂ para vias alternativas, como a produção de propionato, reduzindo a formação de metano. A inclusão do 3-nitrooxipropanol (3-NOP) constitui uma das estratégias nutricionais mais eficazes para mitigar a emissão entérica de metano (CH₄). Esse composto inibe especificamente a enzima metil-coenzima M redutase (MCR), responsável pelo passo final da metanogênese. Sua eficiência, contudo, depende da dose, do tempo de suplementação, da composição da dieta, da relação volumoso:concentrado e do teor de fibra fisicamente efetiva (PUPO et al., 2025). O 3-NOP tem se consolidado como uma estratégia tecnicamente viável, com reduções consistentes nas emissões. Contudo, efeitos produtivos não são necessariamente nulos, e alguns cenários registram leve redução na produção de leite, reforçando a necessidade de avaliar a dose, a dieta e a fase fisiológica (HRISTOV, 2024).

Existem ainda outras práticas com potencial para mitigar a emissão de metano entérico, que podem ser aplicadas em escala comercial e apresentam eficácia comprovada no curto prazo. Entre essas abordagens, destaca-se o uso de macroalgas como aditivo alimentar, uma alternativa que, embora ainda pouco explorada e com lacunas de conhecimento a serem preenchidas, demonstra capacidade

significativa de reduzir a produção de metano pelos ruminantes (HRISTOV, 2024). Assim, à medida que mais pesquisas sejam conduzidas e ajustes tecnológicos sejam realizados, espera-se que essa estratégia contribua de forma expressiva para a diminuição das emissões de metano entérico.

A emissão de metano entérico por ruminantes resulta de interações complexas entre a dieta, a microbiota ruminal, a fisiologia digestiva e as características intrínsecas dos animais. Embora estratégias nutricionais e de manejo sejam amplamente utilizadas para mitigar essas emissões, a genética animal tem ganhado destaque como uma abordagem sustentável e de longo prazo, pois promove alterações permanentes no rebanho ao longo das gerações (HRISTOV et al., 2016).

Diversos estudos demonstram que há variabilidade individual consistente na emissão de metano entre animais mantidos sob condições alimentares e ambientais semelhantes, evidenciando a presença de um componente genético associado a essa característica (LASSEN; LØVENDAHL, 2016; DE HAAS et al., 2021). Estimativas de herdabilidade para a produção de metano, expressa como emissão absoluta (g/dia), emissão relativa ao consumo de matéria seca ou intensidade de emissão (CH₄/kg de produto), geralmente variam entre 0,10 e 0,30, valores considerados suficientes para promover progresso genético por meio da seleção (VAN ENGELEN et al., 2018; DE HAAS et al., 2021).

Uma das principais vias pelas quais a seleção genética pode contribuir para a mitigação do metano está relacionada à eficiência alimentar, especialmente ao consumo alimentar residual (CAR). Animais mais eficientes energeticamente tendem a apresentar menores perdas de energia na forma de metano, uma vez que direcionam uma proporção maior da energia ingerida para funções produtivas, como o crescimento e a lactação. Estudos indicam que bovinos com menor CAR emitem menos metano tanto em termos absolutos quanto por unidade de produto, sem comprometer o desempenho produtivo (DE HAAS et al., 2016).

Além da eficiência alimentar, diferenças genéticas associadas à dinâmica da fermentação ruminal também influenciam a produção de metano. Características como a taxa de passagem ruminal, o padrão de produção de ácidos graxos voláteis e a eficiência no uso do hidrogênio metabólico variam entre indivíduos e são, em parte, controladas pelo genótipo do hospedeiro (WALLACE et al., 2019). Animais geneticamente predispostos a favorecer vias fermentativas alternativas, como a produção de propionato, tendem a reduzir a disponibilidade de hidrogênio para os microrganismos metanogênicos, o que resulta em menores emissões de CH₄ (UNGERFELD, 2015).

O avanço das ferramentas genômicas tem permitido a identificação de regiões genômicas associadas à emissão de metano e a características correlatas, como a eficiência alimentar, a ingestão voluntária e a digestibilidade. Estudos de associação genômica ampla (GWAS) identificaram QTLs e SNPs associados à variação na emissão de metano, abrindo caminho para a aplicação da seleção genômica como ferramenta para a mitigação de gases de efeito estufa na pecuária (VAN ENGELEN et al., 2018). A seleção genômica possibilita a identificação precoce de animais com menor potencial emissor, mesmo na ausência de mensuração direta

do metano, o que representa uma vantagem operacional significativa.

Do ponto de vista da sustentabilidade, a incorporação da genética como estratégia de mitigação apresenta vantagens relevantes, como o efeito cumulativo ao longo das gerações, a ausência de custos operacionais recorrentes e a compatibilidade com outras estratégias, como o uso de aditivos alimentares e ajustes nutricionais (HRISTOV et al., 2016). No entanto, desafios permanecem, especialmente relacionados à mensuração em larga escala do metano, à definição de indicadores indiretos robustos e à necessidade de evitar respostas correlacionadas desfavoráveis às características produtivas, reprodutivas ou de bem-estar animal (LASSEN; LØVENDAHL, 2016).

Dessa forma, a genética configura-se como uma estratégia complementar, eficaz e sustentável para a redução da emissão de metano entérico, sobretudo quando integrada a sistemas de produção eficientes e a programas de melhoramento que considerem simultaneamente a produtividade, a eficiência alimentar e o impacto ambiental. Ao combinar tais intervenções (manipulação dietética + genética animal), abre-se um leque de sinergias: a melhoria da eficiência ruminal favorece menor desperdício energético (metano via fermentação), o que, por sua vez, pode permitir que a seleção genética priorize animais com menor emissão potencial ou maior capacidade de uso do substrato alimentar. Assim, a adoção simultânea dessas estratégias pode contribuir tanto para uma produção mais eficiente quanto para a mitigação das emissões entéricas de metano.

7. DISCUSSÃO INTEGRADA

A comparação dos métodos indica que a equivalência estatística observada na meta-análise não elimina as diferenças práticas entre as técnicas. Sob condições padronizadas, câmara respirométrica, GreenFeed e SF₆ podem produzir estimativas semelhantes; contudo, essa equivalência pode se enfraquecer diante de baixa frequência de visita ao GreenFeed, falhas de calibração do SF₆, alterações comportamentais provocadas pelo confinamento ou amostragem pontual insuficiente. Desse modo, a comparabilidade depende tanto da técnica quanto do desenho experimental, do número de repetições e do controle de qualidade.

Em termos decisórios, as câmaras são mais indicadas para validação de modelos e experimentos com elevado controle; o SF₆ favorece a mensuração individual em pastagens e em sistemas comerciais; o GreenFeed permite amostragem repetida em ambientes menos restritivos, desde que os animais utilizem adequadamente o equipamento; as máscaras atendem a ensaios curtos; as técnicas *in vitro* são úteis para triagem; e os modelos preditivos apoiam inventários e avaliações em larga escala. Assim, erros de medição ou baixa representatividade temporal podem ser amplificados quando os resultados são extrapolados para rebanhos, regiões ou inventários nacionais.

No plano da mitigação, o 3-NOP e a seleção genética atuam em escalas temporais distintas e complementares. O 3-NOP pode produzir uma resposta mais imediata, mas sua adoção depende do custo, da regulamentação, da composição da dieta e da rotina de suplementação. A seleção genética possui efeito cumulativo e permanente, porém exige mensuração ou indicadores indiretos robustos e deve evitar respostas desfavoráveis em produtividade, reprodução e bem-estar. A integração dessas estratégias permite reduzir as

emissões sem tratar a mitigação como um objetivo isolado do desempenho produtivo.

Um cenário integrado envolve o uso de modelos preditivos, como os incorporados ao NS Dairy Cattle, para estimar respostas e selecionar situações prioritárias; a utilização de dados de CH₄ em índices de seleção; e a aplicação de ajustes nutricionais ou de aditivos de acordo com o sistema produtivo. As pesquisas futuras devem ampliar a validação em condições comerciais, avaliar a estabilidade das respostas em longo prazo, aperfeiçoar indicadores de baixo custo e examinar os trade-offs entre emissão absoluta, intensidade de emissão, produtividade e custo da intervenção.

8. CONCLUSÕES

A quantificação do metano entérico constitui uma etapa central para a pesquisa, o manejo, os inventários e as políticas de mitigação. Não existe um método universalmente superior: as câmaras oferecem maior controle experimental; SF₆ e GreenFeed ampliam a aplicação em campo; técnicas *in vitro* favorecem a triagem; e modelos preditivos permitem avaliações em larga escala. A escolha deve considerar simultaneamente precisão, representatividade, custo e finalidade.

A meta-análise indicou estimativas semelhantes entre a câmara respirométrica, o GreenFeed e o SF₆ nas condições avaliadas. Essa equivalência, entretanto, não significa que os métodos sejam intercambiáveis em qualquer contexto, pois a calibração, a frequência de amostragem, o comportamento animal e o desenho experimental podem alterar a qualidade das estimativas.

A mitigação mais consistente depende da integração entre nutrição, aditivos como o 3-NOP, modelos preditivos e melhoramento genético. A adoção em larga escala deve considerar custos, regulamentação e possíveis trade-offs produtivos. Avanços futuros exigem validação em condições comerciais, séries de longo prazo e indicadores acessíveis que permitam reduzir as emissões sem comprometer a eficiência e o bem-estar animal.

9. REFERÊNCIAS

- ALEMU, A. W.; VYAS, D.; MANAFIAZAR, G.; BASARAB, J. A.; BEAUCHEMIN, K. A. Enteric methane emissions from low- and high-residual feed intake beef heifers measured using GreenFeed and respiration chamber techniques. **Journal of Animal Science**, v. 95, n. 8, p. 3727-3737, 2017. <https://doi.org/10.2527/jas.2017.1501>
- APPUHAMY, J. A. D. R. N.; FRANCE, J.; KEBREAB, E. Models for predicting enteric methane emissions from dairy cows in North America, Europe, and Australia and New Zealand. **Global Change Biology**, v. 22, p. 3039-3056, 2016. <https://doi.org/10.1111/gcb.13339>
- BOSHER, T.; DELLA ROSA, M. M.; KHAN, M. A.; SNEDDON, N.; DONAGHY, D.; JONKER, A. Methane emissions intensity in grazing dairy cows fed graded levels of concentrate pellets. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 67, p. 296-302, 2024. <https://doi.org/10.1080/00288233.2023.2296923>
- COTTLE, D. J.; NOLAN, J. V.; WIEDEMANN, S. G. Ruminant enteric methane mitigation: a review. **Animal Production Science**, v. 51, p. 491-514, 2011. <https://doi.org/10.1071/AN10163>

- DANIELSSON, R.; RAMIN, M.; BERTILSSON, J.; LUND, P.; HUHTANEN, P. Evaluation of a gas in vitro system for predicting methane production in vivo. **Journal of Dairy Science**, v. 100, p. 8881-8894, 2017. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12675>
- DE HAAS, Y.; VEERKAMP, R. F.; DE JONG, G.; ALDRIDGE, M. N. Selective breeding as a mitigation tool for methane emissions from dairy cattle. **Animal**, v. 15, sup. 1, e100294, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100294>
- DEIGHTON, M. H.; WILLIAMS, S. R. O.; HANNAH, M. C.; ECKARD, R. J.; BOLAND, T. M.; WALES, W. J.; MOATE, P. J. A modified sulphur hexafluoride tracer technique enables accurate determination of enteric methane emissions from ruminants. **Animal Feed Science and Technology**, v. 197, p. 47-63, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.08.003>
- DINI, Y.; GERE, J.; BRIANO, C.; MANETTI, M.; JULIARENA, P.; PICASSO, V.; GRATTON, R.; ASTIGARRAGA, L. Methane emission and milk production of dairy cows grazing pastures rich in legumes or rich in grasses in Uruguay. **Animals**, v. 2, n. 2, p. 288-300, 2012. <https://doi.org/10.3390/ani2020288>
- DONADIA, A. B.; TORRES, R. N. S.; SILVA, H. M. D.; SOARES, S. R.; HOSHIDE, A. K.; OLIVEIRA, A. S. de. Factors affecting enteric methane emission and predictive models for dairy cows. **Animals**, v. 13, n. 11, e1857, 2023. <https://doi.org/10.3390/ani13111857>
- DOREAU, M.; ARBRE, M.; ROCHETTE, Y.; LASCOUX, C.; EUGÈNE, M.; MARTIN, C. Comparison of 3 methods for estimating enteric methane and carbon dioxide emission in nonlactating cows. **Journal of Animal Science**, v. 96, n. 4, p. 1559-1569, 2018. <https://doi.org/10.1093/jas/sky033>
- GRAINGER, C.; CLARKE, T.; MCGINN, S. M.; AULDIST, M. J.; BEAUCHEMIN, K. A.; HANNAH, M. C.; WAGHORN, G. C.; CLARK, H.; ECKARD, R. J. Methane emissions from dairy cows measured using the Sulfur Hexafluoride (SF₆) tracer and chamber techniques. **Journal of Dairy Science**, v. 90, n. 6, p. 2755-2766, 2006. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-697>
- HAMMOND, K. J.; CROMPTON, L. A.; BANNINK, A.; DIJKSTRA, J.; YÁÑEZ-RUIZ, D. R.; O'KIELY, P.; KEBREAB, E.; EUGÈNE, M. A.; YU, Z.; SHINGFIELD, K. J.; SCHWARM, A.; HRISTOV, A. N.; REYNOLDS, C. K. Review of current in vivo measurement techniques for quantifying enteric methane emission from ruminants. **Animal Feed Science and Technology**, v. 219, p. 13-30, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.05.018>
- HRISTOV, A. N. Invited review: Advances in nutrition and feed additives to mitigate enteric methane emissions. **Journal of Dairy Science**, v. 107, n. 7, p. 4129-4146, 2024. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24440>
- HRISTOV, A. N.; OH, J.; GIALONGO, F.; FREDERICK, T.; HARPER, M. T.; WEEKS, H.; BRANCO, A. F.; PRICE, W. J.; MOATE, P. J.; DEIGHTON, M. H.; WILLIAMS, S. R. O.; KINDERMANN, M.; DUVAL, S. Short communication: Comparison of the GreenFeed system with the sulfur hexafluoride tracer technique for measuring enteric methane emissions from dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 99, n. 7, p. 5461-5465, 2016. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-10897>
- HUHTANEN, P.; CABEZAS-GARCIA, E. H.; UTSUMI, S.; ZIMMERMAN, S. Comparison of methods to determine methane emissions from dairy cows in farm conditions. **Journal of Dairy Science**, v. 98, n. 5, p. 3394-3409, 2015. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-9118>
- HUNGATE, R. E.; SMITH, W.; BAUCHOP, T.; YU, I.; RABINOWITZ, J. C. Formate as an intermediate in the bovine rumen fermentation. **Journal of Bacteriology**, v. 102, n. 2, p. 389-397, 1970. <https://doi.org/10.1128/jb.102.2.389-397.1970>
- IPCC (2019) 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 10: Emissions from Livestock and Manure Management. pp. 10.1-10.207. Gavrilova et al. (eds.). https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch10_Livestock.pdf
- JOHNSON, K. A.; JOHNSON, D. E. Methane emissions from cattle. **Journal of Animal Science**, v. 73, p. 2483-2492, 1995. <https://doi.org/10.2527/1995.7382483x>
- JONKER, A.; MOLANO, G.; ANTWI, C.; WAGHORN, G. C. Enteric methane and carbon dioxide emissions measured using respiration chambers, the sulfur hexafluoride tracer technique, and a GreenFeed head-chamber system from beef heifers fed alfalfa silage at three allowances and four feeding frequencies. **Journal of Animal Science**, v. 94, n. 10, p. 4326-4337, 2016. <https://doi.org/10.2527/jas.2016-0646>
- KREUZER, M. Feed additives for methane mitigation: Introduction - Special issue on technical guidelines to develop feed additives to reduce enteric methane. **Journal of Dairy Science**, v. 108, n. 1, p. 298-301, 2025. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25669>
- LASSEN, J.; LØVENDAHL, P. Heritability estimates for enteric methane emissions from Holstein cattle measured using noninvasive methods. **Journal of Dairy Science**, v. 99, n. 3, p. 1959-1967, 2016. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10012>
- MA, X.; RÄISÄNEN, S. E.; WANG, K.; AMELCHANKA, S.; GILLER, K.; ISLAM, M. Z. Z.; LI, Y.; PENG, R.; REICHENBACH, M.; SERVIENTO, A. M.; SUN, X.; NIU, M. Evaluating GreenFeed and respiration chambers for daily and intraday measurements of enteric gaseous exchange in dairy cows housed in tiestalls. **Journal of Dairy Science**, v. 107, n. 12, p. 10913-10931, 2024. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25246>
- MARTIN, C.; MORGAVI, D. P.; DOREAU, M. Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale. **Animal**, v. 4, n. 3, p. 351-365, 2010. <https://doi.org/10.1017/S1751731109990620>
- MOMBACH, M. A.; CARVALHO, P. de; CABRAL, L. da S.; RODRIGUES, R. de A. R.; TORRES, R. C.; PEREIRA, D. H.; PEDREIRA, B. C. e. Attractants for automated emission measurement (GreenFeed®) in pasture-based systems. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 47, e20170190, 2018. <https://doi.org/10.1590/rbz4720170190>
- NIELSEN, N. I.; VOLDEN, H.; ÅKERLIND, M.; BRASK, M.; HELLWING, A. L. F.; STORLIEN, T.; BERTILSSON, J. A prediction equation for enteric methane emission from dairy cows for use in NorFor. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section A - Animal Science**, v. 63, n. 3, p. 126-130, 2013. <https://doi.org/10.1080/09064702.2013.851275>

- ODAI, M.; NONAKA, I.; SUMAMAL, W.; NARMSILEE, R.; PHOLSEN, P.; CHUENPRECHA, T.; PHROMLOUNGSR, A.; KHOTPROM, N.; PHAOWPHAISAL, I.; INDRAMANEE, S.; SUZUKI, T. Estimation of methane production by lactating and dry crossbred Holstein cows in Thailand. **Japan Agricultural Research Quarterly**, v. 44, n. 4, p. 429-434, 2010. <https://doi.org/10.6090/jarq.44.429>
- OLIVEIRA, A. S. The nutrition system for dairy cattle (ns dairy cattle): a model of energy and nutrients requirements and diet evaluation for dairy cattle. **Mendeley Data**, v. 5, 2024. <https://doi.org/10.17632/hvc7smjib7.5>
- OSS, D. B.; MARCONDES, M. I.; MACHADO, F. S.; PEREIRA, L. G. R.; TOMICH, T. R.; RIBEIRO JR., G. O.; CHIZZOTTI, M. L.; FERREIRA, A. L.; CAMPOS, M. M.; MAURICIO, R. M.; CHAVES, A. V.; MCALLISTER, T. A. An evaluation of the face mask system based on short-term measurements compared with the sulfur hexafluoride (SF₆) tracer, and respiration chamber techniques for measuring CH₄ emissions. **Animal Feed Science and Technology**, v. 216, p. 49-57, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.03.008>
- PIROLA, J. V. F.; ANDRIGHETTO, C. Técnicas e tecnologias de mitigação de gases na produção animal. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 14, p. 1-8, 2022. <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2022.40748>
- PUPO, M. R.; FERRARETTO, L. F.; NICHOLSON, C. F. Effects of feeding 3-nitrooxypropanol for methane emissions reduction on income over feed costs in the United States. **Journal of Dairy Science**, v. 108, n. 5, p. 5061-5075, 2025. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25502>
- RAMIN, M.; HUHTANEN, P. Development of an in vitro method for determination of methane production kinetics using a fully automated in vitro gas system - A modelling approach. **Animal Feed Science and Technology**, v. 174, n. 3-4, p. 190-200, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.03.008>
- RICCI, P.; ROOKE, J. A.; NEVISON, I.; WATERHOUSE, A. Methane emissions from beef and dairy cattle: quantifying the effect of physiological stage and diet characteristics. **Journal of Animal Science**, v. 91, n. 11, p. 5379-5389, 2013. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6544>
- RISCHEWSKI, J.; BIELAK, A.; NÜRNBERG, G.; DERNO, M.; KUHLA, B. Rapid Communication: Ranking dairy cows for methane emissions measured using respiration chamber or GreenFeed techniques during early, peak, and late lactation. **Journal of Animal Science**, v. 95, n. 7, p. 3154-3159, 2017. <https://doi.org/10.2527/jas.2017.1530>
- SAUNOIS, M.; STAVERT, A. R.; POULTER, B.; BOUSQUET, P.; CANADELL, J. G.; JACKSON, R. B.; RAYMOND, P. A.; et al. The Global Methane Budget 2000-2017. **Earth System Science Data**, v. 12, n. 3, p. 1561-1623, 2020. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- STORM, I. M. L. D.; HELLWING, A. L. F.; NIELSEN, N. I.; MADSEN, J. Methods for measuring and estimating methane emission from ruminants. **Animals**, v. 2, n. 2, p. 160-183, 2012. <https://doi.org/10.3390/ani2020160>
- TEDESCHI, L. O.; ABDALLA, A. L.; ÁLVAREZ, C.; ANUGA, S. W.; ARANGO, J.; BEAUCHEMIN, K. A.; BECQUET, P.; BERNDT, A.; BURNS, R.; DE CAMILLIS, C.; et al. Quantification of methane emitted by ruminants: a review of methods. **Journal of Animal Science**, v. 100, n. 7, p. 1-22, 2022. <https://doi.org/10.1093/jas/skac197>
- UNGERFELD, E. M. Shifts in metabolic hydrogen sinks in the methanogenesis-inhibited ruminal fermentation: a meta-analysis. **Frontiers in Microbiology**, v. 6, e037, 2015. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00037>
- VAN ENGELN, S.; BOVENHUIS, H.; VAN DER TOL, P. P. J.; VISKER, M. H. P. W. Genetic background of methane emission by Dutch Holstein Friesian cows measured with infrared sensors in automatic milking systems. **Journal of Dairy Science**, v. 101, n. 3, p. 2226-2234, 2018. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13441>
- VAN WYNGAARD, J. D. V.; MEESKE, R.; ERASMUS, L. J. Effect of concentrate level on enteric methane emissions, production performance, and rumen fermentation of Jersey cows grazing kikuyu-dominant pasture during summer. **Journal of Dairy Science**, v. 101, n. 11, p. 9954-9966, 2018. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14327>
- WALLACE, R. J.; SASSON, G.; GARNSWORTHY, P. C.; TAPIO, I.; GREGSON, E.; BANI, P.; HUHTANEN, P.; BAYAT, A. R.; STROZZI, F.; BISCARINI, F.; et al. A heritable subset of the core rumen microbiome dictates dairy cow productivity and emissions. **Science Advances**, v. 5, n. 7, e8391, 2019. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav8391>
- WATTIAUX, M. A.; UDDIN, M. E.; LETELIER, P.; JACKSON, R. D.; LARSON, R. A. Emission and mitigation of greenhouse gases from dairy farms: the cow, the manure, and the field. **Applied Animal Science**, v. 35, n. 2, p. 238-254, 2019. <https://doi.org/10.15232/aas.2018-01803>
- YAN, T.; PORTER, M. G.; MAYNE, C. S. Prediction of methane emission from beef cattle using data measured in indirect open-circuit respiration calorimeters. **Animal**, v. 3, n. 10, p. 1455-1462, 2009. <https://doi.org/10.1017/S175173110900473X>

Contribuições dos autores: I.P.M.L.: concebeu e delineou o estudo, realizou a pesquisa e a seleção dos artigos, efetuou a extração e análise dos dados, conduziu a metanálise e elaborou e estruturou a versão original do manuscrito. S.C.B.: contribuiu para a estruturação e o aprimoramento do manuscrito, conferiu as referências e participou da revisão crítica, da edição e da elaboração da versão final do artigo. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Declaração de uso de ferramentas de inteligência artificial - A autoria declara que foi utilizada a ferramenta de inteligência artificial (ChatGPT) para a edição de estilo e estrutura lógica do texto, a correção gramatical e ortográfica e a tradução para o inglês.

Disponibilidade de dados: Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos por e-mail, mediante solicitação ao autor correspondente.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflitos de interesses.



Copyright: © 2026 by the authors. This article is an Open-Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons **Attribution-NonCommercial (CC BY-NC)** license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ANEXO

Tabela 1. Comparativo dos métodos para quantificação da emissão de metano entérico em ruminantes.
Table 1. Comparison of methods for quantifying enteric methane emissions in ruminants.

Método	Princípio	Vantagens	Limitações	Acurácia	Custo
Gás Traçador (SF ₆)	Liberação de SF ₆ no rúmen e análise da razão CH ₄ /SF ₆ no ar expirado	Não invasivo, aplicável a campo, alta validade científica	Necessita de cromatografia, calibração rigorosa e controle do risco de contaminação	Alta	Alto
GreenFeed®	Coleta de ar durante visitas espontâneas ao alimentador automatizado.	Automatizado, portátil e aplicável em pasto e em confinamento	Depende de padrão de visitação	Alta	Alto
Câmara Respirométrica	Medição do ar inspirado e expirado em câmara hermética	Alta precisão e controle experimental	Custo alto, confinamento afeta comportamento	Alta	Muito alto
Máscara (Face Mask)	Coleta direta de ar expirado por meio de uma máscara com sensores	Portátil, de baixo custo e útil para ensaios curtos	Desconforto animal, método pontual	Moderada	Baixo a moderado
<i>In vitro</i>	Fermentação ruminal simulada com fluido ruminal e tampões	Baixo custo, alta repetibilidade, triagem de dietas	Não representa completamente o <i>in vivo</i>	Moderada a alta	Baixo
Modelos Preditivos	Equações estatísticas baseadas em dados nutricionais e produtivos	Útil para inventários de emissões de gases em diferentes níveis	Acurácia e precisão dependem do modelo adotado	Variável conforme o modelo e os dados utilizados	Muito baixo