

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS CAV
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL

CHRYSTIAN JASSANÃ CAZAROTTO

DESEMPENHO ANIMAL E INTENSIDADE DE EMISSÃO DE METANO EM
BOVINOS DE CORTE

LAGES
2026

CHRYSTIAN JASSANÃ CAZAROTTO

**DESEMPENHO ANIMAL E INTENSIDADE DE EMISSÃO DE METANO EM
BOVINOS DE CORTE**

Tese de doutorado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciência Animal pelo programa de Pós-graduação em Ciência Animal no Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientador: Prof. Dr. Henrique M. N. Ribeiro Filho

LAGES

2026

CHRYSTIAN JASSANÃ CAZAROTTO

**DESEMPENHO ANIMAL E INTENSIDADE DE EMISSÃO DE METANO EM
BOVINOS DE CORTE**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Henrique M. N. Ribeiro Filho
UDESC

Membros:

Vanessa Peripolli
IFC - Araquari

Tiago Baldissera
Instituição: Epagri - Lages

Vanessa Ruiz Favaro
Instituição: Epagri - Lages

Nome: André Thaler Neto
Instituição: UDESC - Lages

Lages, 27 de fevereiro de 2026.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Henrique M.N. Ribeiro-Filho pela orientação.

Ao FUMDES pela concessão de bolsa de estudos.

À Vanessa Peripolli (IFC – Araquari) e à Maria Eugênia Andrighetto Canozzi (INIA - Uruguai) pelo auxílio na parte metodológica da metanálise.

À Laura Helena Rehbein e à Maria Isabel Martini, colegas do PPGCA – UDESC, pelo auxílio na busca, seleção e tabulação dos dados originados dos artigos.

Um agradecimento especial à Marina Gandolfi (Epagri – Lages) pela proposição da abordagem a ser utilizada na análise de metarregressão e condução dos procedimentos estatísticos em ambiente “R”.

A todos da Epagri - Lages meu agradecimento pelo projeto inicial.

RESUMO

A intensificação sustentável da pecuária de corte demanda estratégias que mitiguem as emissões de metano entérico (CH_4) sem comprometer a eficiência produtiva. Esta tese investigou a relação entre o desempenho produtivo e a emissão de CH_4 em ruminantes por meio de um estudo experimental de campo e uma revisão sistemática com metanálise. No estudo experimental, avaliou-se o desempenho e a metanogênese de novilhos em crescimento mantidos em dois tipos de pasto: campo nativo melhorado (CNM) e *Cynodon spp.* (cv. Jiggs), ambos manejados sob pastejo contínuo com 15 cm de altura média e com os animais recebendo suplementação energética (0,8% do PV). Durante o verão, o CNM apresentou maior oferta de forragem (14% vs. 11% do PV), o que resultou em consumos de matéria seca (11,2 vs. 6,8 kg/dia) e ganhos médios diários (GMD) superiores (0,866 vs. 0,570 kg/dia) em relação ao Jiggs. Embora tenha ocorrido perda de peso em ambos os tratamentos no outono, o balanço do período experimental revelou que o CNM proporcionou um GMD 24% superior e uma intensidade de emissão (g CH_4 /kg GMD) 30% inferior ao Jiggs. A metanálise consolidou dados de 37 artigos e 151 comparações, selecionados de um universo inicial de 3.944 publicações, abrangendo bovinos e ovinos em sistemas de pastejo e confinamento. Utilizou-se uma abordagem de metaregressão para analisar a intensidade de emissão de CH_4 (razão tratamento/controle) em função da variação no GMD. Os resultados confirmaram que a intensidade de emissão está inversamente associada ao aumento do GMD, com efeito significativamente mais pronunciado em sistemas de pastejo do que em confinamento. Adicionalmente, observou-se que ovinos apresentam maior intensidade de emissão comparados a bovinos, independentemente do sistema produtivo ou do nível de desempenho. O estudo experimental demonstrou que o manejo adequado do CNM otimiza o consumo e pode reduzir a intensidade de emissão de CH_4 em comparação a monocultivos. De forma complementar, a síntese metanalítica estabelece uma relação biológica clara, onde o incremento no ganho de peso promove diluição do custo de manutenção do animal, sendo o sistema a pasto o ambiente com maior potencial para mitigação via desempenho. Conclui-se que a intensificação do GMD não é apenas uma meta econômica, mas um imperativo ambiental para a sustentabilidade da produção de carne em ambientes pastoris.

Palavras-chave: bovinos de corte, ganho médio diário, metano, metanálise, pastejo.

ABSTRACT

Sustainable intensification of beef cattle production requires strategies that mitigate enteric methane (CH₄) emissions without compromising productive efficiency. This thesis investigated the relationship between performance and CH₄ emissions in ruminants through a field experiment and a systematic review with meta-analysis. In the experimental study, performance and methanogenesis were evaluated in growing steers under continuous grazing on two pasture types: improved natural grassland (NG) and *Cynodon spp.* (cv. Jiggs), both maintained at a 15-cm sward height and receiving energy supplementation (0.8% BW). During the summer, improved NG provided higher herbage allowance (14% vs. 11% BW), resulting in higher dry matter intake (11.2 vs. 6.8 kg/day) and average daily gain (ADG; 0.866 vs. 0.570 kg/day) compared to Jiggs. Despite weight loss in both treatments during autumn, the overall experimental period revealed that improved NG achieved a 24% higher ADG and a 30% lower emission intensity (g CH₄/kg ADG) than Jiggs. The meta-analysis synthesized data from 37 articles and 151 comparisons, selected from an initial pool of 3,944 publications, covering cattle and sheep in both grazing and feedlot systems. A meta-regression approach was used to analyze CH₄ emission intensity (treatment-to-control ratio) as a function of ADG variation. Results confirmed that emission intensity is inversely associated with increased ADG, with a significantly more pronounced effect in grazing systems than in feedlots. Additionally, sheep exhibited higher emission intensity compared to cattle, regardless of the production system or performance level. The experimental study demonstrated that proper management of improved NG optimizes intake and can reduce CH₄ emission intensity compared to monocultures. Complementarily, the meta-analytical synthesis establishes a clear biological principle: incremental weight gain promotes the dilution of the animal's maintenance requirements. Additionally, grazing systems present the greatest potential for mitigation through performance enhancement. It is concluded that increasing ADG is not only an economic objective but an environmental imperative for the sustainability of beef production in pastoral environments.

Keywords: average daily gain, grazing, beef cattle, meta-analysis, methane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma PRISMA 2020 detalhando o processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos na revisão sistemática	61
Figura 2- Avaliação do risco de viés dos estudos incluídos (n = 151) de 37 artigos selecionados.....	65
Figura 3-Relação entre a variação percentual do ganho médio diário (GMD) e a variação percentual da intensidade de emissão de metano (CH ₄)	65
Figura 4 - Relação entre a variação percentual do ganho médio diário (GMD) e a variação percentual da intensidade de emissão de metano (CH ₄) em bovinos e ovinos	66
Figura 5-Relação entre a variação percentual do ganho médio diário (GMD) e a variação percentual da intensidade de emissão de metano (CH ₄) em ruminantes sob pastejo ou confinamento	67
Figura 6 -Metaregressão entre a variação percentual no ganho médio diário (GMD) e a variação percentual na intensidade de emissão de metano (CH ₄)	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características estruturais, oferta de forragem e composição química de pastos de campo nativo melhorado (CNM) e <i>Cynodum spp.</i> (cv. Jiggs) pastejado por bovinos de corte no subtrópico brasileiro	44
Tabela 2 - Consumo, ganho médio diário (GMD) e emissão de metano por bovinos de corte mantidos em pastagem com campo nativo melhorado (CNM) ou Jiggs, no período de verão (17/01/2024 a 08/04/2024) e outono (08/04/2024 a 20/05/2024).....	45
Tabela 3- Ganho médio diário (GMD) e emissão de metano por bovinos de corte mantidos pastagem com campo nativo melhorado (CNM) ou Jiggs, ao longo de toda a estação de crescimento dos pastos (17/01/2024 a 20/05/2024; 125 dias)	46
Tabela 4 - Características principais dos 37 artigos incluídos na revisão sistemática	62
Tabela 5 - Resultados do modelo completo de metaregressão para a intensidade de emissão de metano, expressos em variação percentual	68
Tabela 6 -Resultados do modelo final de metaregressão para a intensidade de emissão de metano, expressos em variação percentual	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIEC - Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes
AGV - Ácidos Graxos Voláteis
AOAC - Association of Official Analytical Chemists
CA - Carga Animal / Conversão Alimentar
CAV - Centro de Ciências Agroveterinárias
CMS - Consumo de Matéria Seca
CNM - Campo Nativo Melhorado
CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento
CR - Câmara de Respiração
DBC - Delineamento em Blocos Casualizados
DIC - Delineamento Inteiramente Casualizado
DP - Desvio Padrão
DQL - Delineamento em Quadrado Latino
EA - Eficiência Alimentar
EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
EPM - Erro Padrão da Média
FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations
FDA - Fibra em Detergente Ácido
FDN - Fibra em Detergente Neutro
GEE - Gases de Efeito Estufa
GF - GreenFeed
GMD - Ganho Médio Diário
GWP - Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global)
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC - Intervalo de Confiança
IDRF - Identificação por Radiofrequência
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
MF - Massa de Forragem
MO - Matéria Orgânica
MS - Matéria Seca
MSI - Matéria Seca Ingerida
OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development

OF - Oferta de Forragem

PAC - Câmaras de Acumulação Portáteis

PB - Proteína Bruta

PICO - População, Intervenção, Comparador, Desfechos, Tipo de Estudo

PIB - Produto Interno Bruto

PRISMA - Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

PV - Peso Vivo

RFID - Radio Frequency Identification

RoB - Risk of Bias (Risco de Viés)

SDI - Sensores Infravermelhos não Dispersivos

SR-MA - Systematic Review with Meta-Analysis

Tae - Taxa de Acúmulo Estimada

TE - Thermo Environmental Instruments

LISTA DE SÍMBOLOS

CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de Carbono
N_2O	Óxido Nitroso
SF_6	Hexafluoreto de enxofre

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL.....	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	CONTEXTO DAS EMISSÕES E PANORAMA DA BOVINOCULTURA DE CORTE NO BRASIL E NO MUNDO EM 2025	18
2.2	BIOQUÍMICA DA METANOGÊNESE EM RUMINANTES.....	19
2.3	EMIÇÃO DE METANO EM AMBIENTES PASTORIS.....	22
2.4	SUPLEMENTAÇÃO ALIMENTAR E USO DE ADITIVOS NA EMISSÃO DE METANO	23
2.5	TECNOLOGIAS PARA MEDIR AS EMISSÕES DE METANO ENTÉRICO 24	
2.6	RELAÇÃO ENTRE DESEMPENHO PRODUTIVO E INTENSIDADE DE EMISSÃO DE METANO.....	28
	REFERÊNCIAS.....	30
3.	HIPÓTESES.....	36
4.	OBJETIVOS.....	37
5.	EMIÇÃO DE METANO POR BOVINOS DE CORTE EM PASTAGEM NATURAL MELHORADA OU CYNODUM SPP. (CV. JIGGS).....	38
5.1	RESUMO.....	38
5.2	INTRODUÇÃO	39
5.3	MATERIAL E MÉTODOS	40
5.3.1	Localização e Caracterização da Área Experimental	40
5.3.2	Animais e Delineamento Experimental.....	41
5.3.3	Manejo das Pastagens e Suplementação.....	41
5.3.4	Amostragem e Análises Bromatológicas.....	42
5.3.5	Medidas sobre os animais.....	42
5.3.6	Análise Estatística.....	43
5.4	RESULTADOS	44
5.5	DISCUSSÃO	46
5.5.1	Características dos pastos vs. desempenho animal.....	46
5.5.2	Consumo de suplemento.....	47
5.5.3	Emissões de metano.....	48
5.6	CONCLUSÕES	49

REFERÊNCIAS.....	50
6. RELAÇÃO QUANTITATIVA ENTRE DESEMPENHO ANIMAL E A INTENSIDADE DE EMISSÃO DE METANO EM RUMINANTES: REVISÃO SISTEMÁTICA E METANÁLISE.....	52
6.1 RESUMO.....	52
6.2 INTRODUÇÃO	53
6.3 MATERIAL E MÉTODOS	54
6.3.1 Critérios de Elegibilidade	54
6.3.2 Fontes de Informação e Estratégia de Busca	55
6.3.3 Gerenciamento de Referências e Seleção dos Estudos	55
6.3.4 Extração de Dados e Gerenciamento	56
6.3.5 Avaliação do Risco de Viés dos Estudos Incluídos	57
6.3.6 Metanálise	58
6.4 RESULTADOS	60
6.4.1 Estudos Seleccionados	60
6.4.2 Características dos Estudos Incluídos.....	61
6.4.3 Avaliação do Risco de Viés	64
6.4.4 Metanálise	65
6.5 DISCUSSÃO	71
6.5.1 O Panorama da Pesquisa: Caracterização e Lacunas	72
6.5.2 Qualidade Metodológica e Implicações do Risco de Viés	73
6.5.3 Efeito do desempenho animal sobre a intensidade de emissão de CH ₄ 74	
6.6 CONCLUSÕES	76
REFERÊNCIAS.....	77
ANEXO A: BASES DE DADOS E ESTRATÉGIAS DE BUSCA	81
ANEXO B: SCRIPT UTILIZADO NO PROGRAMA COMPUTACIONAL “R” PARA O ESTUDO DE METAREGRESSÃO	83

1. INTRODUÇÃO GERAL

A pecuária de ruminantes firmou-se, nas últimas décadas, como uma base da segurança alimentar global e da estabilidade econômica de diversos países (FERREIRA et al., 2022). Esta atividade apoia-se na capacidade fisiológica dos ruminantes de transformar biomassa fibrosa em proteína de alto valor biológico, como carne e leite (VAN ZANTEN et al., 2018; SMITH et al., 2022). No Brasil, país detentor de um dos maiores rebanhos bovinos comerciais do mundo, a bovinocultura vai além da questão econômica, sendo um elemento central na dinâmica social e cultural do meio rural (MCMANUS et al., 2016; D'AUREA et al., 2021).

No entanto, a importância e o crescimento dessa cadeia produtiva trazem desafios ambientais, principalmente por sua contribuição relevante para o total global de gases de efeito estufa (GEE) emitidos (ROCKSTRÖM et al., 2009; AIKING, 2014). Calcula-se que o setor pecuário responda por cerca de 14,5% das emissões antropogênicas totais, sendo o metano (CH_4) o principal gás (GERBER et al., 2013). O CH_4 é relevante devido ao seu potencial de aquecimento global, estimado em 28 a 34 vezes superior ao do dióxido de carbono (CO_2) num período de 100 anos (MYHRE et al., 2013; IPCC, 2014).

A fonte de CH_4 é a fermentação entérica, processo simbiótico essencial realizado pela microbiota ruminal (HILL et al., 2016). Do ponto de vista energético, a metanogênese é uma perda para o metabolismo do rúmen, consumindo de 2% a 12% da energia bruta ingerida (JOHNSON; JOHNSON, 1995; SMITH et al., 2022). Assim, mitigar essas emissões não é apenas uma necessidade ambiental, mas também uma estratégia de melhorar a eficiência produtiva e energética dos sistemas (BEAUCHEMIN et al., 2022).

Nesse cenário, a intensificação sustentável propõe alinhar o aumento na oferta. Esse conceito busca alinhar o aumento na oferta de proteína animal, exigida pelo crescimento populacional (FAO, 2017), com a redução da pegada de carbono por unidade de produto. A intensificação, vista em melhores índices zootécnicos como o ganho médio diário (GMD), tem sido apontada como um caminho eficaz para a mitigação (HRISTOV et al., 2013a; BEAUCHEMIN et al., 2020). O conceito de 'diluição da manutenção' mostra que, ao elevar o ganho

individual, uma quantidade maior da energia da dieta vai para deposição de tecidos, diluindo o custo de manutenção. Logo, a intensidade da emissão de CH_4 ($\text{g CH}_4/\text{kg GMD}$) cai (GERBER et al., 2013; ZUBIETA et al., 2021). Zubieta et al. (2021) observaram ainda que, após atingir certo ganho de peso, a queda na emissão se torna exponencial, ligando diretamente a produtividade à eficiência ambiental.

Apesar do consenso sobre a redução da intensidade, a relação entre o desempenho animal (GMD) e as emissões absolutas ($\text{g CH}_4/\text{dia}$) continua complexa e não linear. O consumo de matéria seca (CMS) é o principal fator que determina a produção diária de CH_4 (HRISTOV et al., 2018; SMITH et al., 2022). Animais de alto desempenho, por exigirem mais nutrientes, tendem a apresentar maior CMS, o que pode manter ou até aumentar as emissões diárias totais, mesmo com maior eficiência por produto (THOMPSON; ROWNTREE, 2020; ZUBIETA et al., 2021). Essa contradição pede uma análise detalhada sobre como diferentes manejos afetam não só a intensidade, mas também o saldo total de emissões.

O conjunto de estratégias de mitigação é amplo, indo desde o manejo nutricional, como uso de concentrados, lipídeos e aditivos (ex: 3-nitrooxipropanol, taninos) até o melhoramento genético e manejo de pastagens (CARDOSO-GUTIERREZ et al., 2021; ZUBIETA et al., 2021; BEAUCHEMIN et al., 2022). Mas o sucesso dessas intervenções depende da diversidade dos sistemas. Uma diferença-chave está no modelo de produção. A literatura científica foca muito em confinamento, onde dietas ricas em amido criam um ambiente ruminal favorável à rota do propionato, competindo com a metanogênese (JANSSEN, 2010; UNGERFELD, 2015). Os sistemas a pasto (base da produção tropical e subtropical) usam forragens fibrosas, cuja fermentação favorece a produção de acetato e libera hidrogênio, substrato para o CH_4 (ZUBIETA et al., 2021; VARGAS et al., 2022). Aplicar dados de confinamento diretamente para o pastejo é, portanto, impreciso (THOMPSON et al., 2020).

Além disso, a variação nos métodos para medir CH_4 , desde câmaras de respiração ("padrão de referência") até técnicas de campo como o gás traçador SF_6 e sistemas automatizados como o GreenFeed, dificulta a comparação direta

entre estudos (HAMMOND et al., 2016; SMITH et al., 2022). Somado a isso, a qualidade da descrição metodológica em estudos primários, principalmente sobre randomização, é muitas vezes insuficiente, gerando possíveis vieses que precisam ser considerados em análises conjuntas (FERREIRA et al., 2022).

Diante desse cenário, esta tese foi organizada para tratar da relação entre desempenho e emissões de CH₄ em duas abordagens : (1) avaliar experimentalmente o efeito da intensificação de sistemas de pastejo, comparando o uso de pastagens cultivadas de alta qualidade (*Cynodon* spp.) versus campo nativo melhorado sobre o desempenho e as emissões de CH₄; e (2) quantificar de forma global, via revisão sistemática e metanálise, a relação entre o ganho médio diário e a intensidade de emissão de CH₄. Espera-se contribuir para a pecuária sustentável, trazendo evidências sólidas que unam a eficiência produtiva à mitigação de GEE em diferentes cenários.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTEXTO DAS EMISSÕES E PANORAMA DA BOVINOCULTURA DE CORTE NO BRASIL E NO MUNDO EM 2025

A pecuária de corte desempenha um papel fundamental na segurança alimentar e na economia global, mas enfrenta atualmente o desafio de ampliar a oferta de carne de maneira sustentável. O setor segue sob a pressão de atender a um mercado que, além de crescer em volume, tornou-se muito mais rigoroso quanto aos impactos ambientais, questões éticas e padrões sanitários (FAO, 2023). Não basta apenas produzir, é necessário comprovar a eficiência do processo produtivo em um mundo que monitora de perto as pegadas de GEE das atividades agropecuárias.

A dinâmica de consumo mundial mantém uma trajetória de alta, impulsionada principalmente pelo crescimento populacional e pelo aumento da renda em países em desenvolvimento, com destaque para as nações asiáticas (USDA, 2024). Enquanto nos países desenvolvidos o consumo per capita tende à estabilização (ou até redução) devido a mudanças de hábitos alimentares, nos países emergentes a carne bovina continua sendo um item de desejo e ascensão social, sustentando à demanda internacional.

No entanto, a expansão da atividade esbarra na questão climática. A redução das emissões de GEE, especificamente o CH₄ entérico, deixou de ser apenas uma pauta científica para se tornar uma barreira comercial. Acordos climáticos globais e as exigências das grandes cadeias de importação pressionam a pecuária a adotar sistemas que comprovem menor impacto ambiental (UNEP, 2021). O mercado penaliza a ineficiência, e a métrica de GEE passou a ser um indicador de qualidade e gestão tão importante quanto os índices zootécnicos tradicionais.

O Brasil é o segue como o principal produtor e exportador de carne bovina, atendendo a mais de 150 parceiros comerciais (ABIEC, 2024). A projeção de safra superior a 11 milhões de toneladas (CONAB, 2024) reforça a capacidade brasileira de abastecimento, apoiada na competitividade de um modelo produtivo

que tem as pastagens tropicais como base alimentar, o que confere ao produto nacional características distintas de custo e qualidade.

Apesar da predominância do pasto, o sistema produtivo nacional passa por um processo contínuo de intensificação. O uso estratégico de confinamentos e a suplementação nutricional tornaram-se ferramentas comuns para reduzir a idade de abate e girar o estoque mais rapidamente (ANUALPEC, 2024).

O futuro da bovinocultura dependerá, portanto, da capacidade de integrar tecnologias como a pecuária de precisão e a análise de dados para a tomada de decisão (BERCKMANS, 2017). É dentro dessa lógica de eficiência que se insere a mitigação das emissões de CH_4 entérico. Controlar e reduzir essas emissões não é apenas uma medida ambiental, mas uma estratégia indispensável para melhorar o desempenho animal e garantir a longevidade econômica da pecuária brasileira no mercado global.

2.2 BIOQUÍMICA DA METANOGÊNESE EM RUMINANTES

O aumento das concentrações atmosféricas de GEE derivado de atividades antropogênicas constitui a base das alterações climáticas globais, manifestadas pela instabilidade nos regimes pluviométricos e elevação das temperaturas médias (KNAPP et al., 2014; BAHIA, 2024). Dentre os gases emitidos, o metano destaca-se por apresentar um potencial de aquecimento global (GWP) 28 vezes superior ao do dióxido de carbono em um horizonte de 100 anos (SÁNCHEZ ZUBIETA et al., 2020). A pecuária de ruminantes participa dessa dinâmica com uma emissão anual estimada em 115 milhões de toneladas de CH_4 (SANDOVAL-PELCASTRE et al., 2020). Contudo, a origem desse gás não é um subproduto acidental, mas o resultado de um mecanismo evolutivo essencial para a termodinâmica da fermentação entérica (CARDOSO-GUTIERREZ et al., 2021).

O rúmen funciona como um sistema de fermentação anaeróbica contínua, onde a eficiência digestiva depende da interação entre o consumo de matéria seca, a taxa de passagem e a motilidade para mistura e eructação (DAVIDSON; STABENFELDT, 2014). O ambiente ruminal abriga uma microbiota complexa, composta por bactérias, fungos e protozoários, cuja função é hidrolisar polímeros

vegetais e fermentar os monômeros resultantes (KU-VERA et al., 2020). Além disso, no rúmen a degradação de carboidratos gera ácidos graxos voláteis (AGV), fonte primária de energia para o ruminante, mas também libera dióxido de carbono e hidrogênio metabólico. A regulação da pressão parcial de hidrogênio é o ponto crítico da fisiologia ruminal. O acúmulo de hidrogênio impede a reoxidação de coenzimas reduzidas (NADH), o que inibe a ação das desidrogenases e paralisa a degradação da fibra (MORGAVI et al., 2010; UNGERFELD, 2020).

A estabilidade desse sistema depende, portanto, da estreita associação simbiótica com as *Archaea* metanogênicas, microrganismos distintos que atuam como “drenos de elétrons”. A comunidade metanogênica é dominada por espécies do gênero *Methanobrevibacter* (ex.: *M. gottschalkii* e *M. ruminantium*), que representam mais de 60% das arqueias totais (KU-VERA et al., 2020). Estes organismos utilizam predominantemente a via hidrogenotrófica para formar metano e água (SMITH et al., 2022). A eficiência desse processo é aumentada pela associação física com protozoários ciliados, onde as arqueias aderem à superfície celular para captar diretamente o hidrogênio gerado pelas mitocôndrias anaeróbicas (WREDE et al., 2012; CARDOSO-GUTIERREZ et al., 2021). Embora vias alternativas como a metilotrófica e acetoclástica existam, sua contribuição é marginal em animais alimentados com forragem (SMITH et al., 2022).

Apesar de indispensável para a homeostase ruminal, a metanogênese acarreta um custo energético substancial. A energia dissipada na forma de metano eructado varia entre 2% e 12% da energia bruta ingerida, reduzindo a disponibilidade de energia metabolizável para produção de leite ou ganho de peso (HAMMOND et al., 2016; SMITH et al., 2022). A magnitude dessa perda correlaciona-se diretamente com o perfil da dieta. A fermentação da fibra estimula a produção de acetato e a liberação de hidrogênio, favorecendo a metanogênese, enquanto dietas ricas em amido favorecem o propionato, uma via que consome hidrogênio (sumidouro de hidrogênio) (BEAUCHEMIN et al., 2022; VARGAS et al., 2022). Assim, a mitigação das emissões exige estratégias que redirecionem o fluxo de hidrogênio metabólico sem comprometer a eficiência

fermentativa, alinhando produtividade e sustentabilidade ambiental (ALMEIDA et al., 2021; KEBREAB et al., 2023).

A análise dos fluxos de hidrogênio metabólico parte da estequiometria das reações fermentativas. Enquanto a produção de acetato e butirato libera hidrogênio líquido (disponibilizando substrato para a metanogênese), a formação de propionato atua como o principal mecanismo competitivo de consumo de elétrons (UNGERFELD, 2020). Independentemente da rota utilizada, seja a via do succinato (predominante em dietas fibrosas) ou a do acrilato (comum em dietas ricas em amido), a síntese de propionato demanda o uso de equivalentes redutores (NADH) para converter piruvato. Esse processo reduz a concentração de H^2 livre no ambiente ruminal, limitando a disponibilidade de substrato para a atividade das arqueias hidrogenotróficas (VARGAS et al., 2022).

Existem ainda outros sumidouros de elétrons no rúmen, embora de menor expressão quantitativa quando comparados ao propionato. A bio-hidrogenação de ácidos graxos insaturados, por exemplo, sequestra hidrogênio para saturar as duplas ligações dos lipídios da dieta, mas sua capacidade de capturar o gás raramente excede 1% a 2% da produção total (BEAUCHEMIN et al., 2022). Processos como a redução de nitratos a amônia e de sulfatos a sulfetos também funcionam como drenos alternativos. Já a acetogênese redutiva (onde bactérias utilizam H^2 e CO_2 para produzir acetato) tende a ser superada pela metanogênese em bovinos adultos, pois as arqueias possuem maior afinidade termodinâmica pelo hidrogênio em baixas pressões parciais (SMITH et al., 2022).

A eficiência das estratégias de mitigação depende da capacidade de interferir nessa competição por substratos. Diferente do CH_4 , que representa uma perda irreversível de carbono e energia química para a atmosfera, o redirecionamento dos equivalentes redutores para o propionato gera um precursor gliconeogênico. Após a absorção e transporte ao fígado, o propionato é convertido em glicose, contribuindo diretamente para o balanço energético positivo do animal (VARGAS et al., 2022). Dessa forma, a manipulação dos sumidouros de hidrogênio não visa apenas reduzir a emissão de um gás poluente, mas otimizar o aproveitamento da energia da dieta para a produção de carne e leite.

2.3 EMISSÃO DE METANO EM AMBIENTES PASTORIS

A relação entre o manejo de pastagens e a emissão de CH₄ entérico em bovinos de corte à pasto é influenciada pela oferta de forragem, altura do pasto e consumo de matéria seca. Segundo Beauchemin et al. (2008), pastagens degradadas ou com excesso de material senescente aumentam a proporção de fibra indigestível consumida pelos animais, elevando a produção de CH₄ por unidade de matéria seca ingerida. Manter a altura ideal da pastagem favorece a seletividade alimentar, permitindo que os animais consumam forragem de maior qualidade, o que aumenta a digestibilidade e reduz as emissões de CH₄ (VARGAS et al., 2022).

A oferta de forragem desempenha papel essencial no consumo de nutrientes pelos ruminantes. Zubieta et al. (2020) explicam que práticas de manejo, como a manutenção de uma massa de forragem adequada e o ajuste da taxa de lotação, são cruciais para assegurar a produtividade e a qualidade das pastagens. Esse equilíbrio evita o sobrepastejo, que, segundo Ungerfeld (2020), diminui a qualidade da forragem disponível e aumenta a necessidade de fermentação de fibras menos digestíveis, elevando as emissões de CH₄.

A interação entre a altura da pastagem, a interceptação de luz solar e a regeneração da forragem impacta diretamente o consumo de matéria seca e a eficiência alimentar dos ruminantes (ZUBIETA et al., 2020). Manejos que asseguram o crescimento contínuo e a manutenção da qualidade nutricional das pastagens, conseqüentemente reduzem a emissão de metano ao promover uma digestão mais eficiente (SMITH et al., 2022).

Em ambientes pastoris, o ganho de peso dos bovinos está diretamente relacionado ao consumo de matéria seca, à taxa de lotação e à qualidade da forragem disponível (SMITH et al., 2022). No entanto, o aumento do consumo de forragem para garantir um maior ganho de peso também pode resultar em um aumento das emissões de CH₄, uma vez que o CH₄ é produzido durante a fermentação ruminal da matéria orgânica consumida pelos ruminantes (ZUBIETA et al., 2020).

O ganho de peso também pode ser influenciado pela taxa de lotação, que, quando alta, o consumo de forragem com melhor qualidade pode ser prejudicado, levando a um aumento na ingestão de fibras menos digestíveis. Isso não só eleva as emissões de metano, como também pode prejudicar o ganho de peso dos animais, já que a digestibilidade da forragem está diretamente relacionada à eficiência do uso de nutrientes (UNGERFELD, 2020).

2.4 SUPLEMENTAÇÃO ALIMENTAR E USO DE ADITIVOS NA EMISSÃO DE METANO

A suplementação alimentar em bovinos de corte em pastejo tem sido amplamente associada ao aprimoramento da eficiência no uso da forragem e à mitigação das emissões entéricas de CH₄. Estudos como os de Ferrari et al. (2021) e Bahia (2024) destacam que a inclusão de fontes energéticas, como o milho moído, altera positivamente a dinâmica fermentativa no rúmen, favorecendo a formação de propionato. Esse ácido graxo volátil atua como importante sequestrador de hidrogênio, reduzindo sua disponibilidade para as arqueias metanogênicas e, conseqüentemente, diminuindo a produção de metano (UNGERFELD, 2020). A maior oferta de energia também cria um ambiente ruminal mais favorável ao crescimento microbiano, o que eleva a eficiência digestiva e melhora a utilização da forragem (FERRARI et al., 2021; BAHIA, 2024).

Além disso, a suplementação energética contribui para otimizar a síntese de proteína microbiana, ao disponibilizar energia suficiente para o aproveitamento do nitrogênio amoniacal no rúmen. Leite et al. (2021) e Bahia (2024) ressaltam que dietas com maior aporte energético aumentam a fração de proteína degradável no rúmen, sustentando uma microbiota mais eficiente e resultando em menor produção de hidrogênio. Assim, quando integrada ao manejo adequado da pastagem, a suplementação representa uma importante estratégia sustentável, capaz de simultaneamente elevar o desempenho animal e mitigar a intensidade das emissões entéricas (VARGAS et al., 2022).

No contexto de aditivos específicos para mitigação, uma metanálise foi desenvolvida avaliando o uso do composto 3-nitrooxypropanol (3-NOP), que

promove reduções consistentes e expressivas nas emissões de metano em ruminantes. O aditivo atua inibindo a metil-coenzima M redutase, passo final da metanogênese, reduzindo tanto a emissão absoluta quanto a intensidade de metano por unidade de produto. Além disso, o 3-NOP não interfere negativamente na fermentação ruminal nem no desempenho produtivo do animal (KIM et al., 2020).

Alternativas de origem natural também têm demonstrado potencial relevante para a mitigação. Roskam et al. (2024) avaliaram aditivos como extratos vegetais, óleos essenciais e compostos fermentados e observaram reduções significativas nas emissões em ovinos, principalmente quando utilizados suplementos ricos em taninos e compostos fenólicos. Estes metabólitos regulam a microbiota e reduzem a atividade de arqueias metanogênicas, sem prejudicar o consumo ou o desempenho dos animais.

A alga *Asparagopsis taxiformis*, é rica em bromoformo, e quando avaliada em vacas leiteiras reduziu substancialmente as emissões de metano, também por meio da inibição da metil-coenzima M redutase. Quando administrada em níveis adequados, a *Asparagopsis taxiformis* não compromete a ingestão de matéria seca, o metabolismo ou a produção de leite, sendo considerada uma estratégia eficaz para reduzir a pegada ambiental dos sistemas leiteiros (ANGELLOTTI et al., 2025).

Em síntese, as evidências indicam que intervenções nutricionais bem planejadas constituem estratégias efetivas para reduzir a emissão de metano entérico sem comprometer o desempenho animal. Estratégias que ajustam o aporte energético ou introduzem compostos bioativos podem alterar favoravelmente a fermentação ruminal, beneficiando o sistema pecuário (ROSKAM et al., 2024).

2.5 TECNOLOGIAS PARA MEDIR AS EMISSÕES DE METANO ENTÉRICO

A necessidade de quantificar as emissões de CH₄ por eructação e liberação durante o processo de fermentação ruminal levou ao desenvolvimento de diversas metodologias. Entre as técnicas mais amplamente empregadas estão a câmara de respiração (CR), o método traçador de hexafluoreto de

enxofre (SF₆), o sistema de monitoramento de emissões GreenFeed Pasture System (GF), métodos de estimativa e técnicas *in vitro*.

As câmaras de respiração representam o método de referência para a determinação de trocas gasosas em ruminantes, baseando-se nos princípios da calorimetria indireta (JOHNSON; JOHNSON, 1995). O procedimento consiste no confinamento do animal em ambiente hermético (câmara) com controle rigoroso de temperatura e umidade. A produção total de CH₄ é obtida pelo fluxo de ar através da câmara e a diferença na concentração do gás entre o ar de entrada e saída (SMITH et al., 2022). A técnica destaca-se pela capacidade de recuperação integral dos gases emitidos, contabilizando eructação, respiração e flatulência durante períodos de 24 horas ou superiores, o que confere a confiabilidade e repetibilidade aos dados (HAMMOND et al., 2016).

Entretanto, a aplicação desta metodologia impõe limitações substanciais. O confinamento e o isolamento social relacionados ao método podem induzir alterações comportamentais e redução no consumo de matéria seca quando comparados a condições de produção comercial (LLONCH et al., 2018). Adicionalmente, os elevados custos de implantação e de operação restringem o número de unidades experimentais, inviabilizando estudos populacionais extensos. A técnica é inaplicável para sistemas com animais em pastejo, necessitando do fornecimento de forragem cortada, o que suprime o comportamento seletivo característico do pastejo (VARGAS et al., 2022).

A introdução da técnica do SF₆ por Johnson et al. (1994) possibilitou a mensuração de emissões em animais em pastejo livre, superando as restrições de isolamento social, de mobilidade e de seletividade impostas pelas câmaras. O método baseia-se na administração intraruminal de uma cápsula de permeação calibrada, que libera o gás inerte (SF₆) a uma taxa conhecida (RSF₆). Um sistema de amostragem, fixado ao animal, coleta continuamente o ar na região nasolabial, armazenando-o em um recipiente sob vácuo (LASSEY et al., 2001). A estimativa da emissão de CH₄ (QCH₄) pressupõe que o (SF₆) mimetiza o padrão de dispersão do metano ruminal, sendo calculada pela equação:

$$Q(\text{CH}_4) = Q(\text{SF}_6) \times \text{CH}_4 (\text{amostra}) - \text{CH}_4(\text{basal}) / \text{SF}_6 \text{ amostra} - \text{SF}_6 \text{ basal}$$

Esta técnica viabiliza a avaliação de animais em condições de pastejo, preservando as interações sociais, mobilidade e a seletividade da dieta

(BERNDT; TOMKINS, 2013; ZUBIETA et al., 2021). Apesar disso, a variabilidade dos dados tende a ser superior à observada em câmaras (HRISTOV et al., 2018), devido a fatores como variações na taxa de permeabilidade das cápsulas e possíveis vazamentos no sistema de coleta. Além disso, o método não captura as perdas via flatulência (estimadas em 2-4% do total), exigindo a aplicação de fatores de correção para a estimativa da emissão total (HAMMOND et al., 2016).

O GreenFeed Pasture System® (C-Lock Inc., Rapid City, EUA), foi criado por Patrick Zimmerman (HRISTOV et al., 2015). O GreenFeed é uma tecnologia desenvolvida mais recentemente para a estimativa de emissões entéricas de ruminantes, com capacidade de medir CH₄, CO₂, sulfeto de hidrogênio (H₂S), oxigênio (O₂) e H₂ emitidos por ruminantes. É uma ferramenta não invasiva baseada na web system que estima as emissões gasosas de animais individuais com o uso de medições de respiração de curto prazo coletadas ao longo do dia (MANAFIAZAR et al., 2016). O GF consiste em uma câmara principal, recipiente de alimentação e alimentador automático de dieta, equipado com sensores de identificação por radiofrequência (IDRF) para identificar animais individuais equipados com etiquetas IDRF (HRISTOV et al., 2015). Quando o animal aproxima-se do comedouro, cada animal é identificado pelo sistema por meio de sua etiqueta IDRF exclusiva. Uma pequena quantidade de pellets é liberada para atrair e estimular os animais a permanecerem no sistema por mais de 3 min (MANAFIAZAR et al., 2016). À medida que o animal consome os pellets, um exaustor, posicionado na parte superior da unidade, coleta o ar que é exalado. O fluxo de ar é calculado usando um anemômetro com um subconjunto de ar amostrado antes da saída (HAMMOND et al., 2016), com concentrações de gás medidas usando sensores infravermelhos não dispersivos (SDI), embutidos embaixo do prato de alimentação (HRISTOV et al., 2015).

As medições de emissão são normalmente feitas durante um período de 3–7 min, distribuídas por vários pontos de tempo ao longo do dia, e dependem da visita voluntária do animal ao sistema (HUHTANEN et al., 2015), e dos dados carregados em uma interface baseada na web em uma base horária. A concentração de gases emitidos por um animal é relatada como um fluxo de gás (concentração de um gás individual emitido sobre um período definido; g/dia)

com as três equações abaixo realizadas a cada segundo (HUHTANEN et al., 2015):

$Q_{air}(i) = 60 \times V_m(i) \times V_{adj}(i) \times A_p \times 1,000$ Equação 1: Cálculo do fluxo de ar (adaptado de HUHTANEN et al., 2015).

(i) = cálculo a qualquer momento; Q_{air} = taxa de fluxo de ar volumétrico (l/min) calculado com base em gás seco a 1 unidade de pressão atmosférica (atm) pressão; 60 = conversão de tempo; V_m = velocidade do ar em o centro (m/s) do tubo que é ajustado automaticamente por sensores para pressão de 1 atm; V_{adj} = é um fator de correção (0,88) para levar em conta o V_m para uma velocidade média do tubo; A_p = área da seção transversal do tubo (0,00811 m²); 1.000 = conversão de unidades.

$Q_c(i) = [C_p(i) \times (Conc_i - BConc_i) \times Q_{air}(i)] / 106$ Equação 2: Cálculo da concentração de gás (adaptado de HUHTANEN et al., 2015).

(i) = cálculo a qualquer momento; Q_c = vazão volumétrica de gases individuais (l/min); C_p = taxa de captura de ar; $Conc$ = concentração de gás capturado; $BConc$ = concentração de gás de fundo; Q_{air} = fluxo de ar volumétrico da equação 1; 106 = conversão de partes por milhão (ppm) para concentração de gás. $Q_m(i) = Q_c(i) \times 273,15 / (273,15 + T_{air}(i)) \times p_c$ (3) Equação 3: Cálculo do fluxo de gás, com base na lei dos gases ideais, adaptado de Huhtanen et al. (91).

(i) = cálculo a qualquer momento; Q_c = vazão volumétrica de gases individuais (l/min) da equação 2; 273,15 = temperatura equivalente em Kelvin; T_{air} = temperatura do ar (°C); p_c = densidade de gás investigativo a 273,15 K e 1 atm (0,717 e 1,911 g/L para CH₄ e CO₂).

$Q_m(i) = Q_c(i) \times 273,15 / (273,15 + T_{air}(i)) \times p_c$ Equação 3: Cálculo do fluxo de gás, com base na lei dos gases ideais, adaptado de HUHTANEN et al. (2015).

(i) = cálculo a qualquer momento; Q_c = vazão volumétrica de gases individuais (l/min) da equação 2; 273,15 = temperatura equivalente em Kelvin; T_{air} = temperatura do ar (°C); p_c = densidade de gás investigativo a 273,15 K e 1 atm (0,717 e 1,911 g/L para CH₄ e CO₂).

Diante das restrições logísticas e financeiras das mensurações *in vivo*, métodos indiretos são frequentemente empregados para triagem experimental e inventários. A técnica de fermentação *in vitro*, simula o ambiente ruminal através da incubação de substratos com inóculo ruminal em recipientes fechados a 39°C.

A produção de CH_4 é quantificada no espaço vazio do frasco (headspace) ou estimada estequiometricamente a partir dos ácidos graxos voláteis (AGV) produzidos (JAYANEGARA et al., 2012). Embora útil para a avaliação preliminar de aditivos, esta técnica não reproduz a complexidade da dinâmica do animal, como as taxas de absorção e de passagem e a interação simbiótica (microrganismos-animal) (CARDOSO-GUTIERREZ et al., 2021).

Além disso, equações de predição utilizam variáveis de fácil mensuração, como CMS e composição bromatológica da dieta (FDN, extrato etéreo), para estimar as emissões (RAMIN; HUHTANEN, 2013). Modelos baseados na termodinâmica da fermentação (balanço de hidrogênio) também são aplicados (JANSSEN, 2010; UNGERFELD, 2015). Estas estimativas incorporam os erros intrínsecos das equações originais e podem falhar na detecção de efeitos específicos de inibidores diretos da metanogênese.

2.6 RELAÇÃO ENTRE DESEMPENHO PRODUTIVO E INTENSIDADE DE EMISSÃO DE METANO

A mitigação das emissões de GEE na pecuária não pode ser dissociada da eficiência produtiva. Nesse contexto, a relação entre o ganho médio diário (GMD) e a produção de CH_4 entérico constitui um pilar central para a avaliação da sustentabilidade dos sistemas. A métrica de "intensidade de emissão" ($\text{g CH}_4/\text{kg}$ de produto) é amplamente aceita pela comunidade científica como o indicador mais robusto para conciliar a redução do impacto climático com a demanda global por alimentos (HEGARTY et al., 2010; GERBER et al., 2013). O fundamento biológico desse conceito reside na diluição dos custos energéticos de manutenção: animais com maiores taxas de ganho alocam, proporcionalmente, uma menor fração da energia líquida consumida para a manutenção de funções vitais e uma maior fração para a deposição de tecido, resultando em menor síntese de metano por unidade de produto, ainda que a produção diária absoluta do gás possa aumentar em função do consumo elevado (KNAPP et al., 2014; CONGIO et al., 2021).

A dinâmica inversa entre a eficiência de desempenho e a intensidade de emissão tem sido corroborada em diversos cenários produtivos. Em análises

abrangentes sobre estratégias nutricionais, observa-se que o aumento na densidade energética da dieta e na taxa de passagem reduz o rendimento de CH_4 por quilo de matéria seca ingerida (GUYADER et al., 2016). Entretanto, é a resposta em GMD que determina a magnitude da redução na intensidade. Situações em que o aporte nutricional não se traduz em ganho de peso efetivo (devido a fatores como estresse ambiental, desbalanço na relação proteína:energia ou baixa digestibilidade da fibra basal) resultam em um crescimento exponencial da emissão por quilo de ganho. Nesses casos, o animal emite metano apenas para sustentar suas exigências basais, sem gerar o "produto" necessário para diluir essa emissão (MCGEOUGH et al., 2018).

Essa ineficiência torna-se crítica em sistemas de pastejo sujeitos à estacionalidade quantitativa e qualitativa da forragem. A restrição na qualidade da dieta não apenas limita o GMD, mas altera o perfil de fermentação ruminal, favorecendo a rota acetogênica e a liberação de hidrogênio, o que torna o metano um dreno energético obrigatório (ALEMU et al., 2017). Dados de sistemas tropicais indicam que animais com baixos índices de ganho de peso (inferiores a 0,3 kg/dia) apresentam intensidades de emissão significativamente superiores às de animais com desempenho moderado a alto. Isso ocorre porque, em baixos desempenhos, a quase totalidade da energia bruta consumida é dissipada em calor (incremento calórico) e energia de gases, restando uma fração insignificante para a retenção líquida de energia (MERRY; SOARES-FILHO, 2017; TEDESCHI et al., 2019).

A suplementação estratégica apresenta-se como ferramenta para corrigir tais distorções, embora sua eficácia dependa da interação associativa entre o suplemento e a forragem base. O fornecimento de concentrados em pastagens de baixa qualidade pode gerar efeitos de substituição ou redução na digestão da fibra, impedindo o aumento esperado no GMD (DOREAU et al., 2014). Quando isso ocorre, a suplementação eleva o custo do sistema e a pegada de carbono dos insumos sem a contrapartida da redução na intensidade de CH_4 entérico.

Portanto, a mitigação efetiva via aumento de GMD depende intrinsecamente da sincronia entre a oferta de forragem, a degradação da proteína da pastagem, e a disponibilidade de carboidratos fermentáveis, maximizando a síntese de proteína microbiana (DETMANN et al., 2014).

REFERÊNCIAS

- ABIEC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNES. **Beef Report: Perfil da Pecuária no Brasil**. São Paulo: ABIEC, 2024.
- AIKING, H. Protein production: planet, profit, plus people? **American Journal of Clinical Nutrition**, [s. l.], v. 100, n. 1, p. 483S-489S, 2014.
- ALEMU, A. W. et al. Effect of stocking rate and backgrounding system on greenhouse gas emissions from beef cow-calf production systems. **Journal of Animal Science**, [s. l.], v. 95, n. 10, p. 4627–4641, 2017.
- ALMEIDA, A. K. de et al. Sustainable intensification of livestock production in the tropics. **Livestock Science**, [s. l.], v. 250, p. 104576, 2021.
- ANGELLOTTI, M. et al. Asparagopsis taxiformis supplementation to mitigate enteric methane emissions in dairy cows - effects on performance and metabolism. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25258>.
- ANUALPEC. **Anuário da Pecuária Brasileira**. São Paulo: FNP, 2024.
- BAHIA, A. S. **Mudanças climáticas e impactos na agropecuária brasileira**. 2024. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2024.
- BEAUCHEMIN, K. A. et al. Current enteric methane mitigation options. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 105, n. 10, p. 7861-7884, 2022.
- BEAUCHEMIN, K. A. et al. Invited review: Current enteric methane mitigation options. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 105, n. 12, p. 9297–9326, 2022.
- BEAUCHEMIN, K. A. et al. Methane mitigation from ruminant livestock: technologies, regulations, and policies. **Animal**, [s. l.], v. 14, n. s3, p. s482-s495, 2020.
- BEAUCHEMIN, K. A.; KREUZER, M.; O'MARA, F.; MCALLISTER, T. A. Nutritional management for enteric methane abatement: a review. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, [s. l.], v. 48, n. 2, p. 21-27, 2008.
- BERCKMANS, D. General introduction to precision livestock farming. **Animal Frontiers**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 6-11, 2017.
- BERNDT, A.; TOMKINS, N. W. Measurement and mitigation of methane emissions from beef cattle in tropical grazing systems: A perspective from Australia and Brazil. **Animal**, [s. l.], v. 7, n. s2, p. 363–372, 2013.

CARDOSO-GUTIERREZ, E. et al. Effect of tannins from tropical plants on methane production from ruminants: A systematic review. **Veterinary and Animal Science**, [s. l.], v. 14, p. 100214, 2021.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO.
Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Brasília: Conab, 2024.

CONGIO, G. F. S. et al. Strategic supplementation decreases enteric methane emissions of beef steers grazing tropical pastures. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 783, p. 147029, 2021.

D'AUREA, A. P. et al. Greenhouse gas emissions and carbon footprint of beef cattle production in Brazil: a systematic review. **Animal Production Science**, [s. l.], v. 61, n. 13, p. 1293-1304, 2021.

DAVIDSON, S.; STABENFELDT, G. H. Digestive physiology. In: CUNNINGHAM, J. G.; KLEIN, B. G. (Ed.). **Textbook of Veterinary Physiology**. 5. ed. St. Louis: Saunders Elsevier, 2014.

DETMANN, E. et al. Protein supplementation of cattle grazing tropical grass: Implications for intake and forage utilization. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [s. l.], v. 43, n. 11, p. 613–627, 2014.

DONOGHUE, K. A. et al. Genetic and genomic strategies to reduce methane emissions from livestock. **Animal Production Science**, [s. l.], v. 56, n. 3, p. 256–267, 2016.

DOREAU, M. et al. Mitigation of enteric methane by dietary manipulation in dairy cows. **Reproduction, Nutrition, Development**, [s. l.], v. 53, n. 5, p. 1117–1138, 2014.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The future of food and agriculture – Trends and challenges**. Rome: FAO, 2017.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2023**. Rome: FAO, 2023.

GERBER, P. J. et al. **Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities**. Rome: FAO, 2013.

GUYADER, J. et al. Methane emissions from beef cattle: A meta-analysis of the effect of diet composition and quality. **Animal**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 418–430, 2016.

HAMMOND, K. J. et al. Methane emissions from ruminants fed stored forages: A review of techniques and results. **Animal Feed Science and Technology**, [s. l.], v. 219, p. 1-13, 2016.

HEGARTY, R. S. et al. Cattle methane production and yield in the feedlot and at pasture. **Animal Production Science**, [s. l.], v. 50, n. 10, p. 863–870, 2010.

HILL, J. et al. Microbial fermentation in the rumen and its role in methane production. **FEMS Microbiology Ecology**, [s. l.], v. 92, n. 4, 2016.

HRISTOV, A. N. et al. **Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production – A review of technical options for non-CO2 emissions**. Rome: FAO, 2013a.

HRISTOV, A. N. et al. Nitrogen in ruminant nutrition: A review of measurement techniques. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 102, n. 7, p. 5811–5852, 2018.

HRISTOV, A. N. et al. The use of an automated system (GreenFeed) to monitor enteric methane carbon dioxide emissions from ruminant animals. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 7, p. 52904, 2015.

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**, [s. l.], v. 98, n. 5, p. 3394–3409, 2015.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa da Pecuária Municipal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.

JANSSEN, P. H. Influence of hydrogen on rumen methane formation and fermentation balances through microbial growth kinetics and thermodynamics. **Animal Feed Science and Technology**, [s. l.], v. 160, n. 1-2, p. 1-22, 2010.

JAYANEGARA, A.; LEIBER, F.; KREUZER, M. Meta-analysis of the relationship between dietary tannin level and methane formation in ruminants from in vivo and in vitro experiments. **Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition**, [s. l.], v. 96, n. 3, p. 365–375, 2012.

JOHNSON, K. A. et al. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a sulfur hexafluoride tracer technique. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 359–362, 1994.

JOHNSON, K. A.; JOHNSON, D. E. Methane emissions from cattle. **Journal of Animal Science**, [s. l.], v. 73, n. 8, p. 2483-2492, 1995.

KEBREAB, E. et al. A meta-analysis of effects of 3-nitrooxypropanol on methane production, yield, and intensity in dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 106, n. 2, p. 927–936, 2023.

KIM, H. et al. The effects of dietary supplementation with 3-nitrooxypropanol on enteric methane emissions, rumen fermentation, and production performance in ruminants: a meta-analysis. **Journal of Animal Science and Technology**, [s. l.], v. 62, p. 31-42, 2020.

KNAPP, J. R. et al. Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and cost of mitigation. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 97, n. 6, p. 3231–3261, 2014.

KU-VERA, J. C. et al. Manipulation of the rumen microbiome for methane mitigation. In: MALMKUTH, R. (Ed.). **Rumen Microbiology: From Evolution to Revolution**. New Delhi: Springer, 2020.

LASSEY, K. R.; WALKER, C. F.; ULYATT, M. J. The sulfur hexafluoride tracer technique for ruminant methane: Re-evaluating its precision and accuracy. **Canadian Journal of Animal Science**, [s. l.], v. 81, p. 594, 2001.

LLONCH, P. et al. Changes in feed intake during isolation stress in respiration chambers may impact methane emissions assessment. **Animal Production Science**, [s. l.], v. 58, n. 6, p. 1011–1016, 2018.

MANAFIAZAR, G.; ZIMMERMAN, S.; BASARAB, J. Repeatability and variability of short-term spot measurement of methane and carbon dioxide emissions from beef cattle using GreenFeed emissions monitoring system. **Canadian Journal of Animal Science**, [s. l.], v. 97, p. 118–126, 2016.

MCGEOUGH, E. J. et al. Methane emissions and energy utilization in beef cattle fed grass-based diets. **Journal of Animal Science**, [s. l.], v. 96, n. 6, p. 2354–2366, 2018.

MCMANUS, C. et al. Dynamics of Cattle Production in Brazil. **PLOS ONE**, [s. l.], v. 11, n. 1, e0147509, 2016.

MERRY, F.; SOARES-FILHO, B. Will intensification of beef production deliver conservation outcomes in the Brazilian Amazon? **Elementa: Science of the Anthropocene**, [s. l.], v. 5, p. 24, 2017.

MORGAVI, D. P. et al. Microbial ecosystem and methanogenesis in ruminants. **Animal**, [s. l.], v. 4, n. 7, p. 1024–1036, 2010.

MYHRE, G. et al. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press, 2013.

NKRUMAH, J. D. et al. Methane emissions, energy partitioning, and residual feed intake in growing beef cattle. **Journal of Animal Science**, [s. l.], v. 84, p. 145–153, 2006.

- OECD-FAO. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032**. Paris: OECD Publishing, 2023.
- RAMIN, M.; HUHTANEN, P. Development of equations for predicting methane emissions from ruminants. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 96, n. 4, p. 2476–2493, 2013.
- ROCKSTRÖM, J. et al. A safe operating space for humanity. **Nature**, [s. l.], v. 461, p. 472-475, 2009.
- ROSKAM, E. et al. Enteric methane emission reduction potential of natural feed supplements in ewe diets. **Journal of Animal Science**, [s. l.], v. 102, 2024.
- SÁNCHEZ ZUBIETA, A. et al. Does grazing management provide opportunities to mitigate methane emissions by ruminants in pastoral ecosystems? **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 754, p. 142029, 2021.
- SANDOVAL-PELCASTRE, A. A. et al. Methanogenesis and methane mitigation strategies in ruminants. **Tropical Animal Health and Production**, [s. l.], v. 52, p. 2757–2767, 2020.
- SMITH, P. E. et al. Enteric methane research and mitigation strategies for pastoral-based beef cattle production systems. **Frontiers in Veterinary Science**, [s. l.], v. 9, p. 958340, 2022.
- TEDESCHI, L. O. et al. Ruminant production systems: The role of mathematical modeling in the sustainability of livestock production. **Animal Frontiers**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 30–36, 2019.
- THOMPSON, L. R.; ROWNTREE, J. E. Invited Review: Methane sources, quantification, and mitigation in grazing beef systems. **Applied Animal Science**, [s. l.], v. 36, n. 4, p. 556-573, 2020.
- UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions**. Nairobi: UNEP, 2021.
- UNGERFELD, E. M. Metabolic Hydrogen Flows in Rumen Fermentation: Principles and Possibilities of Interventions. **Frontiers in Microbiology**, [s. l.], v. 11, p. 589, 2020.
- UNGERFELD, E. M. Shifts in metabolic hydrogen sinks in the methanogenesis-inhibited ruminal fermentation: a meta-analysis. **Frontiers in Microbiology**, [s. l.], v. 6, p. 37, 2015.
- USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Livestock and Poultry: World Markets and Trade**. Washington, D.C.: USDA, 2024.

VAN ZANTEN, H. H. E. et al. Defining a land boundary for sustainable livestock consumption. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 24, n. 9, p. 4185-4194, 2018.

VARGAS, J. et al. Feeding Strategies to Mitigate Enteric Methane Emission from Ruminants in Grassland Systems. **Animals**, [s. l.], v. 12, n. 9, p. 1132, 2022.

WREDE, C. et al. Archaea in symbioses. **Archaea**, [s. l.], v. 2012, Article ID 596846, 2012.

ZUBIETA, A. S. et al. Performance, methane production, and beef lipid profile of young bulls finished in feedlot. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 56, e02324, 2021.

3. HIPÓTESES

Os capítulos seguintes foram desenvolvidos a partir das seguintes hipóteses:

O campo nativo melhorado pode apresentar desempenho animal e emissões de CH₄ de origem entérica equivalentes aos de uma pastagem perene de ciclo estival (Jiggs).

A intensidade de emissão de CH₄ reduz à medida que melhora o desempenho animal, independentemente da espécie (bovinos ou ovinos) ou do sistema produtivo (pasto ou confinamento).

4. OBJETIVOS

Os objetivos dos estudos apresentados a seguir foram:

Comparar o desempenho produtivo e a emissão de metano entérico de novilhos em campo nativo melhorado *versus* uma pastagem de Jiggs (*Cynodon* spp.), visando identificar qual ambiente proporciona maior eficiência na conversão de forragem em produto animal com menor impacto climático.

Quantificar, a partir de uma revisão sistemática e metanálise, a relação global entre o ganho médio diário e a intensidade de emissão de CH₄, determinando como a espécie animal e o sistema de produção influenciam essa dinâmica para apontar os cenários mais favoráveis à mitigação.

5. DESEMPENHO E EMISSÃO DE METANO POR BOVINOS DE CORTE EM PASTAGEM NATURAL MELHORADA OU *CYNODUM SPP.* (CV. JIGGS)

5.1 RESUMO

O setor pecuário enfrenta o desafio de conciliar a segurança alimentar com a mitigação de gases de efeito estufa, sendo o metano entérico (CH_4) um indicador de ineficiência energética e impacto ambiental. Objetivou-se comparar o desempenho produtivo e a intensidade de emissão de CH_4 de bovinos de corte em terminação mantidos em dois sistemas de pastejo no subtropical brasileiro: campo nativo melhorado (CNM) e pastagem cultivada de *Cynodon spp.* (cv. Jiggs). O experimento, conduzido em Lages-SC, na estação experimental da EPAGRI no período de verão (17/01/2024 a 08/04/2024) e outono (08/04/2024 a 20/05/2024). Utilizou 24 novilhos cruzados sob lotação contínua com metas de manutenção da altura dos pastos em 15 cm de altura e suplementação energética de 0,8% do PV. As emissões de gases foram mensuradas via sistema automatizado GreenFeed, o consumo de forragem foi medido pela técnica dos n-alcanos e o consumo de suplemento pelo sistema Intergado®. No período de verão, o CNM proporcionou maior oferta de forragem (14 vs. 11% do PV), além de maior consumo de MS total (11,2 vs. 6,8 kg MS/dia) e ganho médio diário (GMD) (0,866 vs. 0,570 kg/dia) em comparação ao Jiggs; entretanto, no outono os animais de ambos os sistemas perderam peso. Ao longo de todo o período experimental a emissão absoluta de CH_4 foi semelhante entre os sistemas, mas a intensidade de emissão foi 30% inferior no CNM em comparação ao Jiggs (530 vs. 748 g CH_4 /kg GMD). Conclui-se que o manejo tecnificado do campo nativo, ao assegurar oferta de forragem, pode apresentar maior eficiência bioenergética e potencial de mitigação do que sua substituição por pastagens exóticas durante o verão. Contudo, a perda de peso no outono em ambos os sistemas reforça a necessidade de ajustes sazonais de manejo e de estratégia de suplementação para sustentar o desempenho animal e a mitigação das emissões de CH_4 na bovinocultura de corte.

Palavras-chave: campo nativo melhorado, ganho médio diário, pastejo

5.2 INTRODUÇÃO

A pecuária de ruminantes desempenha um papel fundamental na segurança alimentar global e na manutenção econômica dos sistemas rurais (SMITH et al., 2022). Entretanto, o setor é desafiado a reduzir sua contribuição para o aquecimento global, visto que a fermentação entérica é uma fonte significativa de metano (CH₄), um potente gás de efeito estufa. Estima-se que sistemas de pastejo respondam por quase metade das emissões da pecuária (FAO, 2021), sendo o metano também um indicador de ineficiência energética, representando a perda de 2% a 12% da energia bruta ingerida pelo animal (VARGAS et al., 2022).

Diante desse cenário, a busca por estratégias de mitigação tornou-se prioritária, incluindo intervenções nutricionais e de manejo (HRISTOV et al., 2018; CARDOSO et al., 2020). Em sistemas a pasto, a eficiência da mitigação não depende apenas da qualidade intrínseca da planta (teor de fibra ou proteína), mas também da estrutura do dossel e da oferta de forragem. Estes fatores influenciam diretamente o comportamento de ingestão de alimento, o tamanho do bocado e a taxa de passagem, alterando os padrões de fermentação ruminal e a produção de metano (BECK et al., 2021). Portanto, o desafio consiste em determinar o ponto de equilíbrio entre a qualidade da forrageira e o manejo da pastagem para maximizar o consumo.

Na região Sul do Brasil, a base forrageira é constituída majoritariamente pelo campo nativo. Embora adaptado e resiliente, esse bioma apresenta limitações de qualidade e oferta estacional. O melhoramento de áreas formadas por pastos naturalizados, com a correção da fertilidade do solo e a introdução de espécies exóticas de ciclo hibernar (como azevém e trevos), apresenta-se como uma estratégia para incrementar a produtividade e a qualidade da dieta sem a substituição total da cobertura vegetal original, potencializando o uso do recurso natural.

Por outro lado, a intensificação via substituição do campo nativo por espécies cultivadas de maior produtividade, como o gênero *Cynodon* (ex: Jiggs),

aliada à suplementação energética, é apontada como alternativa para maximizar o ganho de peso e diluir as emissões por unidade de produto (VARGAS et al., 2022). A suplementação com fontes de amido, como o milho, altera a proporção de ácidos graxos voláteis no rúmen, favorecendo rotas que competem com a metanogênese (HRISTOV et al., 2018). Contudo, é necessário comparar se a introdução de pastagens exóticas supera, em eficiência produtiva e ambiental, o manejo tecnificado do campo nativo. Foi testada a hipótese que o melhoramento do campo natural pode proporcionar repostas equivalentes àsquelas observadas em pastos formados predominantemente por capim Jiggs.

O presente estudo teve como objetivo comparar o desempenho produtivo (GMD) e a intensidade de emissão de metano entérico ($\text{g CH}_4/\text{kg GMD}$) de bovinos de corte em terminação mantidos em pastagem de campo nativo melhorado versus pastagem de *Cynodon* spp. (Jiggs).

5.3 MATERIAL E MÉTODOS

5.3.1 Localização e Caracterização da Área Experimental

O experimento foi conduzido na Estação Experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), localizada no município de Lages, Santa Catarina, Brasil (coordenadas 27°49'30"S e 50°19'35"W; altitude média de 916 m). O período experimental compreendeu 88 dias, estendendo-se de 22 de fevereiro a 20 de maio de 2024, abrangendo o final do verão e o outono.

As áreas experimentais foram divididas em dois tipos de pasto:

Campo nativo melhorado (CNM): Área de 5,6 hectares composta por pastagem natural submetida a melhoramento via fertilização e introdução de espécies hibernais. A composição florística predominante incluiu espécies nativas como *Andropogon lateralis* Nees, *Cyperus rotundus* e *Paspalum notatum*, consorciadas com espécies exóticas introduzidas: *Trifolium repens* (trevo-branco), *Trifolium pratense* L. (trevo-vermelho), *Lolium multiflorum* (azevém anual), *Dactylis glomerata* L., *Lotus corniculatus* L. e *Holcus lanatus* L.

Capim Jiggs: Área de 2 hectares estabelecida com *Cynodon* spp. cv. Jiggs, consorciada com *Trifolium repens* L. e presença espontânea de espécies como *Axonopus compressus*, *Paspalum umbrosum*, *Paspalum dilatatum*, *Setaria parviflora*, *Croton glandulosus*, *Sida rhombifolia* e *Digitaria ciliaris*.

5.3.2 Animais e Delineamento Experimental

Foram utilizados 24 novilhos cruzados de raças de corte, machos castrados, com idade média de 24 meses e peso vivo (PV) inicial médio de 387 ± 34 kg. O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, com os animais distribuídos em dois tratamentos correspondentes aos sistemas de pastejo, com nove animais por tratamento.

5.3.3 Manejo das Pastagens e Suplementação

Adotou-se o método de pastejo contínuo com carga variável (Put-and-take), conforme descrito por Mott e Lucas (1952), mantendo-se a altura média do dossel em 15 cm para ambos os sistemas. O monitoramento da altura foi realizado semanalmente utilizando uma régua graduada (sward stick) a partir de 200 medidas por unidade experimental em pontos aleatórios.

A taxa de acúmulo de forragem foi avaliada a cada 14 dias utilizando o método das gaiolas de exclusão (DAVIES et al., 1993). Foram distribuídas 10 gaiolas de exclusão em cada área experimental. A massa de forragem (MF) foi estimada através de cortes rentes ao solo utilizando quadros de $0,25 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$, dentro e fora das gaiolas.

A oferta de forragem (OF) foi calculada utilizando a equação proposta por Faria et al. (2005):

Equação 1:

$$CA = \left(\left(\frac{MF}{Pa} \right) + TAe \right) * \frac{100}{OF}$$

CA = Carga animal para ajuste da oferta de forragem desejada (kg ha^{-1}), MF = massa de forragem média da pastagem (kg ha^{-1}), Pa = período de ajuste em dias, TAe = taxa de acúmulo do pasto estimada para o período ($\text{kg ha}^{-1} \text{dia}$), OF = oferta diária de forragem ($\text{kg MS por 100 kg de PV dia}^{-1}$).

Os animais receberam suplementação energética (milho moído 78%, sal branco 20% e 2% núcleo mineral, ambos expressos em % na matéria natural). O sal foi misturado com o objetivo de limitar o consumo em 0,8% do PV. O fornecimento foi realizado através do sistema de alimentação inteligente *Intergado*® (Intergado Science, Brasil). Este sistema, equipado com balanças e leitores de radiofrequência (RFID), permitiu o controle preciso e o registro individual do consumo diário de suplemento.

5.3.4 Amostragem e Análises Bromatológicas

Para a avaliação qualitativa da dieta, realizou-se a coleta de forragem via simulação de pastejo (hand-plucking) (Johnson, 1978), em intervalos de aproximadamente uma semana, totalizando 10 amostragens ao longo do período experimental (22/02 a 20/05).

As amostras foram pesadas, pré-secas em estufa de ventilação forçada a 55°C até peso constante e moídas em moinho tipo Wiley com peneira de 1 mm. Foram determinados os teores de matéria seca (MS), matéria orgânica (MO) e proteína bruta (PB) segundo a AOAC (2007). As análises de fibra em detergente neutro (FDN) e fibra em detergente ácido (FDA) seguiram a metodologia de Van Soest et al. (1991).

5.3.5 Medidas sobre os animais

O GMD foi calculado pela diferença de peso entre pesagens consecutivas dividida pelo número de dias do intervalo. Para isso, os animais foram pesados individualmente em uma balança eletrônica, no início do experimento e a cada 28 dias, sempre após jejum prévio de sólidos e líquidos de 12 horas.

O consumo de MS foi medido em dois períodos, de 22/02/2024 a 05/03/2024 (verão) e de 09/05/2024 a 20/05/2024 (outono). O consumo individual de concentrado foi medido com o uso do equipamento automatizado (Intergado Science, Brasil), enquanto o consumo de consumo de forragem foi obtido pela técnica dos n-alcanos (MAYES et al. 1986). Em cada período, os animais receberam via oral, duas vezes por dia (7h00 e 16h00), cápsulas de celulose (Carl Roth, GmbH, Karlsruhe, Germany) contendo $147 \pm 1,2$ mg de dotriacontano (C_{32}). Nos últimos cinco dias de cada período foram coletadas amostras de fezes para determinação da concentração em alcanos (C_{29} , C_{31} , C_{32} e C_{33}). Neste mesmo período também foram coletadas amostras de forragem, por simulação de pastejo, com o mesmo objetivo. O consumo de MS total foi calculado pela relação entre a ingestão do alcano externo (C_{32}). A escolha pelo C_{31} se deu em função das baixas concentrações de C_{33} no Jiggs.

As emissões de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) foram mensuradas utilizando o sistema automatizado GreenFeed (C-Lock Inc., Rapid City, EUA). Um equipamento foi instalado no interior de cada piquete, permitindo o acesso voluntário dos animais. O sistema libera pequenas quantidades de atrativo alimentar para manter o animal com a cabeça posicionada no exaustor, onde sensores infravermelhos medem a concentração de gases.

Para a validação dos dados, foram considerados apenas os animais que realizaram visitas com duração superior a 3 minutos. As emissões diárias (g/dia) foram calculadas pelos algoritmos do sistema, que integram o fluxo de ar, a concentração de gases capturada e a calibração automática. O rendimento da emissão de metano foi calculado pela relação entre a emissão diária absoluta de CH_4 e a quantidade de MS ingerida (MSI). A intensidade de emissão foi calculada pela relação entre a emissão diária absoluta e o GMD (g CH_4 /kg GMD).

5.3.6 Análise Estatística

As variáveis relacionadas à pastagem serão apresentadas de forma descritiva, enquanto os dados dos animais foram submetidos à análise de variância seguindo um delineamento experimental inteiramente casualizado, considerando os efeitos do tipo de pasto (campo nativo melhorado ou Jiggs), das

estações do ano (verão ou outono) e sua interação. Os efeitos fixos foram testados pelo teste F, e quando detectada significância, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

5.4 RESULTADOS

A altura do dossel se manteve próxima da meta de manejo preconizada (15 cm), com exceção do Jiggs no outono, quando a altura média do pasto foi 13 cm (Tabela 1). A oferta de MS média no campo nativo melhorado foi 13% do PV, enquanto os animais pastando Jiggs receberam uma oferta com média 9,5% do PV ao longo do experimento. A massa de forragem (MF) foi em média 800 kg MS/ha superior no outono comparada ao verão, independente de tratamento. Os teores de PB e FDN foram 102 e 689 g/kg MS no CNM, enquanto os pastos de Jiggs apresentaram valores de 137 e 666 g/kg MS, respectivamente.

Tabela 1 - Características estruturais, oferta de forragem e composição química de pastos de campo nativo melhorado (CNM) e *Cynodum spp.* (cv. Jiggs) pastejado por bovinos de corte no subtropical brasileiro

Variável	Tratamento			
	CNM		JIGSS	
Período	Verão	Outono	Verão	Outono
Biomassa (kg MS/ha)	2973	3555	3027	4070
Altura (cm)	16	15	16	13
Oferta (% PV)	14	11,6	9,0	10
Composição química (g/kg MS)				
MS (g/kg verde)	920	930	920	930
MO (g/kg MS)	930	914	924	904
PB (g/kg MS)	116	87	136	138
FDN (g/kg MS)	662	715	648	663
FDA (g/kg MS)	325	367	31,9	32,6

O GMD foi significativamente superior nos animais pastando CNM em comparação aos animais pastando Jiggs no verão, mas no outono os animais de ambos os tratamentos perderam peso, com média de aproximadamente -0,400 kg/dia (interação tratamento $\times$ período: $P = 0,004$) (Tabela 2). O consumo de MS de forragem (+ 5,7 kg/dia) e de MS total (+ 3,4 kg/dia) foram superiores nos animais em CNM comparados aos animais em pasto de Jiggs ($P < 0,001$),

enquanto o consumo de concentrado aumentou 2,3 kg/dia nos animais em pasto de Jiggs comparados aos animais no CNM ($P < 0,001$). As emissões diárias de CH₄ tenderam a ser superiores ($P = 0,094$) nos animais em CNM comparados aos animais em pasto de Jiggs, mas a emissão por kg de MS consumida foi significativamente inferior ($P = 0,001$) no CNM.

Ao longo de toda a estação de crescimento dos pastos (Tabela 3), o GMD foi aproximadamente 100 g/dia superior no CNM comparado ao Jiggs ($P = 0,002$), enquanto as emissões diárias de CH₄ não diferiram significativamente entre tratamentos (média = 198 g/dia). Contudo, a intensidade de emissão foi 30% inferior nos animais em CNM em comparação Jiggs.

Tabela 2 - Consumo, ganho médio diário (GMD) e emissão de metano por bovinos de corte mantidos em pastagem com campo nativo melhorado (CNM) ou Jiggs, no período de verão (17/01/2024 a 08/04/2024) e outono (08/04/2024 a 20/05/2024)

Variável	Período				<i>dpr</i> ¹	Valor de <i>P</i>		
	Verão		Outono					
	Tratamento	CNM	Jiggs	CNM		Jiggs	Trat	Per
PV inicial (kg)	381	390	443	433	35,0	0,969	< 0,001	0,436
PV final (kg)	452	437	424	419	36,4	0,448	0,079	0,696
GMD (kg/dia)	0,866 ^a	0,570 ^b	- 0,456 ^a	-0,331 ^a	0,194	0,215	< 0,001	0,004
<i>Consumo MS</i>								
Concentrado	0,8	2,8	2,1	4,5	0,85	< 0,001	< 0,001	0,496
Forragem	10,4	4,0	9,8	4,8	2,54	< 0,001	0,907	0,426
Total (kg/dia)	11,2	6,8	11,9	9,3	2,58	0,001	0,077	0,308
Total (% PV)	2,7	1,6	2,7	2,2	0,58	0,001	0,182	0,210
<i>Metano</i>								
g/dia	203	197	203	190	15,6	0,094	0,500	0,512
g/kg MSI ²	18,8	30,3	18,0	22,2	5,8	0,001	0,035	0,074
g/kg GMD	243	378	-	-	-	0,005	-	-

¹Desvio padrão residual.

²Matéria seca ingerida.

Tabela 3- Ganho médio diário (GMD) e emissão de metano por bovinos de corte mantidos pastagem com campo nativo melhorado (CNM) ou Jiggs, ao longo de toda a estação de crescimento dos pastos (17/01/2024 a 20/05/2024; 125 dias)

Variável	Tratamento		<i>dpr</i> ¹	Valor de <i>P</i>
	CNM	Jiggs		
PV inicial (kg)	370	390	30,3	0,221
PV final (kg)	419	424	31,6	0,738
GMD (kg/dia)	0,385	0,272	0,058	0,002
<i>Metano</i>				
g/dia	201	194	14,3	0,414
g/kg MS ingerida	18,2	25,3	3,75	0,002
g/kg GMD	530	748	160,4	0,017

¹Desvio padrão residual.

5.5 DISCUSSÃO

5.5.1 Características dos pastos vs. desempenho animal

Os maiores ganhos médios diários observados nos animais mantidos no sistema CNM durante o verão podem ser atribuídos, ao menos em parte, à maior oferta de forragem em comparação ao Jiggs (14 vs. 9% do PV). Apesar da adoção da mesma altura como critério de manejo, os resultados evidenciam que essa estratégia impôs ofertas contrastantes entre os pastos, afetando negativamente o consumo potencial de forragem e, consequentemente, o desempenho animal no sistema Jiggs, independentemente das discretas diferenças nos teores de PB e FDN entre os tratamentos.

Esses achados reforçam que a eficiência produtiva e ambiental dos sistemas avaliados foi determinada prioritariamente pela estrutura do dossel e pela oferta de forragem, e não pela composição química isolada dos pastos. Embora a forragem de *Cynodon* spp. tenha apresentado teores ligeiramente superiores de PB e inferiores de FDN, essa vantagem qualitativa não se refletiu em maior ganho de peso, indicando limitação no consumo efetivo da forragem basal. Em contraste, o sistema CNM proporcionou maior oferta de biomassa com

impacto no aumento do consumo de forragem. Adicionalmente, a diversidade florística característica desse sistema pode ter favorecido maior seletividade dietética, permitindo aos animais compensar a menor qualidade média por meio da ingestão de frações mais digestíveis das plantas (Smith et al., 2022).

Durante o outono, a perda de peso observada em ambos os sistemas reflete a estacionalidade da produção forrageira, típica do subtropico brasileiro, e a maturação fenológica das plantas, evidenciada pelo aumento expressivo dos teores de FDN, especialmente no CNM (715 g/kg MS). Nesse contexto, mesmo com suplementação, não foi possível evitar o balanço energético negativo e o catabolismo tecidual.

De forma integrada, os resultados indicam que o manejo tecnificado dos pastos naturalizados, ao assegurar oferta adequada de forragem e permitir elevada seletividade, promoveu maior eficiência metabólica no verão em comparação à intensificação via substituição da flora por *Cynodon* spp. Ademais, o sistema Jiggs demandou maior aporte de insumos exógenos, incluindo maior ingestão de suplemento, sem retorno proporcional em desempenho.

5.5.2 Consumo de suplemento

A dinâmica de ingestão de suplemento evidenciou diferentes mecanismos de regulação do consumo entre os sistemas. O maior consumo de concentrado observado no Jiggs está diretamente associado ao menor consumo de forragem nesse tratamento. Embora a inclusão de fontes amiláceas, como o milho, seja reconhecida por favorecer a produção de propionato e reduzir a disponibilidade de hidrogênio para a metanogênese (HRISTOV et al., 2013a; UNGERFELD, 2020), esse potencial efeito mitigador não foi suficiente para compensar a ineficiência sistêmica decorrente da restrição ao consumo de forragem.

Nesse cenário, o suplemento atuou sem promover resposta produtiva significativa, resultando em um sistema de maior custo e baixa eficiência de conversão. Esses resultados corroboram Jiao et al. (2014) e Dall-Orsoletta et al. (2019), que demonstram que a suplementação só reduz a intensidade das emissões quando há incremento marginal de desempenho, o que não ocorreu no sistema Jiggs.

5.5.3 Emissões de metano

As emissões de metano observadas refletem de forma clara a diferença da eficiência bioenergética dos sistemas avaliados. A tendência de aumento no volume absoluto de CH₄ emitido no CNM (Tabela 2) é biologicamente coerente com a maior ingestão e fermentação ruminal de matéria orgânica. No entanto, essa emissão foi diluída pela superior taxa de ganho de peso, resultando em menor intensidade de emissão ao longo do período experimental validando o conceito de “diluição da manutenção” (BEAUCHEMIN et al., 2022).

Em contraste, a baixa taxa de ganho no sistema Jiggs implicou que grande parte das emissões tivesse caráter improdutivo, elevando significativamente a pegada de carbono por unidade de produto. Esse cenário foi agravado no outono, quando a persistência da metanogênese, associada à perda de peso em ambos os tratamentos, configurou uma condição de elevada ineficiência termodinâmica, na qual o carbono ingerido é perdido sem geração de produto zootécnico.

A análise integrada evidencia que a intensidade das emissões não foi determinada pelos teores de PB ou FDN *per se*, mas pela capacidade do sistema em converter energia ingerida em ganho de peso. Embora a suplementação energética possua base teórica sólida para mitigação da metanogênese (MOE e TYRRELL, 1979; JOHNSON e JOHNSON, 1995; BERCHIELLI et al., 2011), sua eficácia depende de sinergia com a forragem basal. No sistema Jiggs, o elevado consumo de suplemento (2,8 a 4,5 kg/dia) não se traduziu em eficiência produtiva, resultando em elevada intensidade de emissão (748 g CH₄/kg GMD).

Por outro lado, o sistema CNM, ao demandar menor aporte de suplemento (1,1 kg/dia) e sustentar maior ganho de peso, alcançou intensidade de emissão significativamente inferior (530 g CH₄/kg GMD), demonstrando maior eficiência de conversão energética. Além disso, sob a perspectiva da sustentabilidade global, a menor dependência de concentrados reduz o impacto das emissões indiretas associadas à produção de grãos (Berchielli et al.; 2012; Knapp et al., 2014).

Em síntese, os resultados indicam que a eficiência produtiva e ambiental dos sistemas avaliados foi determinada principalmente pela capacidade do manejo em assegurar oferta adequada de forragem ao longo do ano. Nas condições deste estudo, o sistema CNM apresentou uma relação mais favorável entre consumo, desempenho e emissões, configurando-se como uma estratégia produtiva mais eficiente e resiliente durante o verão. Contudo, no outono, ainda são necessários ajustes no manejo do dossel e na estratégia de suplementação para maximizar a eficiência produtiva e ambiental dos sistemas.

5.6 CONCLUSÕES

Os resultados evidenciaram que o manejo tecnificado do campo nativo demonstrou ser uma alternativa sustentável para bovinos em crescimento, podendo superar a estratégia de substituição por pastagem exótica no subtropical brasileiro durante o verão. Entretanto, a perda de peso no outono em ambos os sistemas reforça a necessidade de ajustes sazonais de manejo e da estratégia de suplementação para sustentar o desempenho animal e a mitigação de CH₄ ao longo do ano.

REFERÊNCIAS

AOAC - ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of AOAC International**. 18. ed. Gaithersburg: AOAC International, 2007.

BECK, M. R. et al. Seasonal effect on feed intake and methane emissions of cow-calf systems on native grassland with variable herbage allowance. **Animals**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 882, 2021.

BERCHIELLI, T. T.; MESSANA, J. D.; CANESIN, R. C. Produção de metano entérico em pastagens tropicais. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 954-968, 2012.

BERCHIELLI, T. T.; VEGA, A.; CANESIN, R. C. Metano entérico em pastagens. In: SIMPÓSIO DE PECUÁRIA DE CORTE, 2., 2011, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2011. p. 195-218.

CARDOSO, A. S. et al. How do greenhouse gas emissions vary with biofertilizer type and soil temperature and moisture in a tropical grassland? **Pedosphere**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. 607-617, 2020.

CARVALHO, P. C. F.; SANTOS, D. T.; NEVES, F. P. Oferta de forragem como condicionadora da estrutura do pasto e do desempenho animal. In: SIMPÓSIO DE FORRAGEIRAS E PRODUÇÃO ANIMAL, 2., 2011, Pelotas. **Anais...** Pelotas: UFPel, 2011.

DALL-ORSOLETTA, A. C. **Emissão de metano entérico: uma análise do animal ao sistema de produção de leite**. 2019. Tese (Doutorado em Ciência Animal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2019.

DAVIES, A.; FOTHERGILL, M.; JONES, D. Assessment of herbage production in grazing systems. In: DAVIES, A. et al. (Ed.). **Sward measurement handbook**. 2. ed. Reading: British Grassland Society, 1993.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Methane emissions in livestock and rice systems: sources, quantification, mitigation and metrics**. Rome: FAO, 2021.

FARIA, A. F. et al. Ajuste da carga animal em experimentos de pastejo: uma nova proposta. **Ciência Rural**, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 917-922, 2005.

FARO, A. M. C. **Intensidades de emissão de gás metano de bovinos Nelore terminados a pasto e cruzados em confinamento**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2017.

FERREIRA, O. G. L. Manejo de pastagens naturais. In: **Manejo de pastagens naturais e outros sistemas agroflorestais**. Fortaleza: UFC, 2008.

JIAO, H. P. et al. Effect of concentrate feed level on methane emissions from grazing dairy cows. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 97, n. 11, p. 7043-7053, 2014.

MACHADO, F. S. et al. **Estratégias nutricionais de mitigação do metano entérico**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2013. (Comunicado Técnico, 72).

MAYES, R. W.; LAMB, C. S.; COLGROVE, P. M. The use of dosed an herbage n-alkanes as markers for determination of herbage intake. **Journal of Agriculture Science**, v.107, p.161-170, 1986.

MOE, P. W.; TYRRELL, H. F. Methane production in dairy cows. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 62, n. 10, p. 1583-1586, 1979.

MOLOSSI, L. et al. Pasture intensification in beef cattle production can affect methane emission intensity. **Journal of Animal Science**, [s. l.], v. 98, n. 10, skaa309, 2020.

OLIVEIRA, G. G. **Produção de carne bovina: estratégias para mitigar o metano entérico produzido**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

O'NEILL, B. F. et al. Effects of cereal and maize silages on intake, performance and methane emissions in dairy cows in late lactation. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 95, n. 12, p. 6969-6980, 2012.

THIAGO, L. R. L.; SILVA, J. M. **Suplementação de bovinos em pastejo**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2000. (Circular Técnica, 27).

VAN SOEST, P. J. **Nutritional ecology of the ruminant**. 2. ed. Ithaca: Cornell University Press, 1994.

6. RELAÇÃO QUANTITATIVA ENTRE DESEMPENHO ANIMAL E A INTENSIDADE DE EMISSÃO DE METANO EM RUMINANTES: REVISÃO SISTEMÁTICA E METANÁLISE

6.1 RESUMO

A intensificação da produção animal pode ser uma ferramenta para mitigar a intensidade das emissões de gases de efeito estufa (GEE) por meio do efeito de diluição da manutenção. Este estudo teve como objetivo quantificar a relação entre o ganho médio diário (GMD) e a intensidade de emissão de metano (CH_4) em ruminantes por meio de uma revisão sistemática e metanálise. O trabalho consolidou dados de 37 artigos e 151 comparações, selecionados de um universo inicial de 3.944 publicações, abrangendo bovinos e ovinos em sistemas de pastejo e confinamento. Todos os artigos selecionados apresentavam dados de GMD e de intensidade de emissão de CH_4 ($\text{g CH}_4/\text{kg GMD}$). A metanálise utilizou uma abordagem de metaregressão para analisar a variação na intensidade de emissão de CH_4 (razão tratamento/controle) em função da variação no GMD, investigando também os efeitos da espécie animal e do sistema de produção. Os resultados confirmaram que reduções na intensidade de emissão de CH_4 estão associados a aumentos no desempenho produtivo. Além disso, houve interação significativa entre GMD e o sistema de produção, indicando que o benefício da intensificação foi superior em sistemas com animais em pastejo. Ainda, para o mesmo GMD, ovinos apresentaram, em média, maior intensidade de emissão de CH_4 do que bovinos em ambos os sistemas. Conclui-se que a intensificação produtiva é uma ferramenta eficaz de mitigação indireta, sobretudo em ambientes pastoris. Dessa forma, o foco global na redução do impacto ambiental da pecuária de corte baseada em pasto deve priorizar a transição para patamares superiores de GMD, maximizando a eficiência da fermentação ruminal por unidade de produto.

Palavras-chave: bovinos, CH_4 , ganho médio diário, metaregressão, pastejo, ovinos

6.2 INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por proteína animal de alta qualidade consolida a pecuária de ruminantes como um pilar estratégico para a segurança alimentar mundial (SMITH et al., 2022). Bovinos e ovinos possuem a capacidade singular de converter recursos fibrosos, como pastagens e subprodutos agroindustriais inadequados ao consumo humano, em carne e nutrientes (VAN ZANTEN et al., 2018). Em nível global, os sistemas pastoris sustentam centenas de milhões de animais (FAO, 2018) e constituem a base produtiva em regiões como a América do Sul (ZUBIETA et al., 2021).

Contudo, o setor pecuário é também um dos principais contribuintes das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE), responsável por cerca de 14,5% do total global (GERBER et al., 2013). O metano (CH_4), com potencial de aquecimento global 28 a 34 vezes superior ao do CO_2 (MYHRE et al., 2013; IPCC, 2014), é o principal gás emitido, proveniente majoritariamente da fermentação entérica, processo microbiano característico do rúmen (ZUBIETA et al., 2021). Essa emissão representa, além de um impacto climático relevante, uma perda energética de 2% a 12% da energia bruta ingerida (SMITH et al., 2022), prejudicando a eficiência alimentar.

O desempenho animal é diretamente influenciado pelo consumo de matéria seca (CMS), que é o principal determinante da produção de CH_4 (HRISTOV et al., 2018). Dessa forma, aumentos do GMD podem elevar as emissões absolutas de CH_4 (THOMPSON e ROWNTREE, 2020; SMITH et al., 2022), sendo essa relação modulada por fatores de manejo e ambiente. Por exemplo, em confinamento, dietas com alto teor de grãos reduzem o pH ruminal e favorecem a produção de propionato, rota que compete com a metanogênese pelo hidrogênio metabólico (BEAUCHEMIN et al., 2022).

De outra forma, o aumento da eficiência produtiva tem sido reconhecido como uma das estratégias mais efetivas de mitigação das intensidades de emissão (g CH_4 /kg produto) (BEAUCHEMIN et al., 2022). O maior ganho médio diário (GMD) reduz a intensidade de emissão (g CH_4 /kg de produto) por meio do “efeito de diluição da manutenção”, quando uma fração maior da energia ingerida é destinada à produção, e não à manutenção (BEAUCHEMIN et al., 2020).

Nesse sentido, Zubieta et al. (2021) demonstraram que melhorias no ganho médio diário (GMD), decorrentes de ajustes no manejo das pastagens de 0,3 para 0,7 kg/dia — podem resultar em reduções de até 55% na intensidade de emissão de CH₄, enquanto D'Aurea et al. (2021) observaram reduções na pegada de carbono acima de 60% quando o ganho médio diário de bovinos aumentou de 0,250 para 0,820 kg/dia. Em ambos os casos os resultados observados estão associados a reduções na idade de abate dos animais.

Embora revisões anteriores tenham abordado estratégias específicas, como o uso de taninos (CARDOSO-GUTIERREZ et al., 2021) ou o manejo de pastagens (ZUBIETA et al., 2021), ainda não há síntese quantitativa abrangente sobre a relação entre GMD e a intensidade de emissão de CH₄ em ruminantes. Soma-se a isso a limitação metodológica de diversos estudos, marcada por falhas no relato de randomização e de alocação. O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão sistemática e metanálise para quantificar a relação entre o GMD e as emissões de CH₄, e investigar como essa relação é modulada por fatores-chave (moderadores), incluindo a espécie animal (bovinos vs. ovinos) e o sistema de produção (confinamento vs. pastejo).

6.3 MATERIAL E MÉTODOS

Esta revisão sistemática com metanálise (SR-MA) foi conduzida em conformidade com as diretrizes do “Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA)” (PAGE et al., 2021). O protocolo detalhado para esta revisão pode ser encontrado no Anexo I.

6.3.1 Critérios de Elegibilidade

Os critérios de elegibilidade foram estruturados com base no framework PICOS (População, Intervenção/Exposição, Comparador, Desfechos, Tipo de Estudo). A população incluiu estudos envolvendo bovinos de corte ou ovinos de qualquer sexo ou categoria (bezerros, novilhos, cordeiros etc.), independentemente do sistema produtivo (pasto ou confinamento). Como intervenção foram considerados quaisquer fatores que pudessem influenciar o

desempenho e/ou a emissão de CH₄ (por exemplo: aditivo alimentar, tipo de dieta ou manejo). O comparador foi obtido quando ocorria a existência de um grupo controle vs. outro grupo recebendo alguma das intervenções, ou por comparações entre diferentes níveis de uma intervenção. Para ser considerado relevante, um estudo devia obrigatoriamente mencionar os desfechos primários: ganho médio diário e intensidade de emissão de CH₄ (g CH₄/kg GMD).

6.3.2 Fontes de Informação e Estratégia de Busca

Uma busca sistemática e abrangente da literatura foi conduzida entre 4 e 11 de fevereiro de 2025, nas seguintes bases de dados eletrônicas multidisciplinares e especializadas: Medline (via PubMed), Scopus, Web of Science (Core Collection), CABI Digital Library, e ProQuest Dissertations & Theses. Adicionalmente, o Google Scholar foi consultado, sendo os primeiros 100 resultados mais relevantes para cada variação da estratégia de busca avaliados quanto à elegibilidade.

As palavras-chave utilizadas na estratégia de busca foram: (cattle* OR Cow OR Cows OR "Bos indicus" OR Zebu* OR Taurus OR "Bos grunniens" OR Yak OR Yaks OR Holstein OR bovine OR beef OR calf OR calves OR steer* OR heifer* OR bull OR bulls OR ox OR oxen OR bullock* OR grazing OR foraging OR "feed crop*" OR "fodder crop*" OR ((pastur* OR herbage OR forage) AND allowance*) OR "sward height" OR "canopy height") AND ("methane emission*" OR "methane production" OR "methane yield" OR "methane intensity" OR "CH₄" OR "Ym") AND weight* OR weighing OR "daily gain" OR (("dry matter" OR herbage OR pasture OR forage OR feed) AND intake) OR "DMI" OR "ADG"). As estratégias de busca para cada base de dados podem ser visualizadas no Apêndice I.

6.3.3 Gerenciamento de Referências e Seleção dos Estudos

Todos os registros recuperados das bases de dados foram importados para o software de gerenciamento de referências Zotero (versão 7.0.16 for Windows

Zotero Team). As duplicatas foram identificadas e removidas utilizando a funcionalidade do software e verificação manual.

Os registros únicos foram subsequentemente importados para a plataforma web Rayyan QCRI (OUZZANI et al., 2016) para facilitar o processo de triagem colaborativa. A seleção dos estudos foi inicialmente efetuada por dois revisores (CAZAROTTO, C.J. e REHBEIN, L.H), os quais avaliaram independentemente todos os títulos, resumos (quando disponíveis) e palavras-chave (quando disponíveis) com base nos critérios de elegibilidade pré-definidos. Para ser considerado elegível o estudo precisava obrigatoriamente ter sido conduzido com bovinos de corte ou ovinos e ter resultados de ambos os desfechos de interesse (ganho médio diário e intensidade de emissão de metano).

Os estudos foram classificados como "incluir", "excluir" ou "talvez". Os mesmos dois revisores avaliaram independentemente a elegibilidade de cada artigo de texto completo, aplicando rigorosamente os critérios de inclusão e exclusão.

As discordâncias foram resolvidas através de discussão e consenso entre os dois revisores. Caso o consenso não fosse alcançado, um terceiro revisor (RIBEIRO-FILHO, H.M.N.) foi consultado para tomar a decisão final.

6.3.4 Extração de Dados e Gerenciamento

Para cada estudo elegível, as informações foram extraídas usando um formulário padronizado de coleta de dados. As publicações foram avaliadas quanto ao idioma (inglês, espanhol ou português), presença de um grupo controle ou comparação apropriada e disponibilidade de dados quantitativos suficientes para a metanálise. Quando uma única publicação relatou mais de um ensaio ou comparação independente, os dados foram extraídos separadamente para cada estudo.

As informações coletadas de cada estudo incluíram detalhes sobre a população, a intervenção e os desfechos de interesse, bem como informações do manuscrito (nome do periódico, autor(es), ano de publicação e idioma). Para cada desfecho, os seguintes dados foram extraídos: média, desvio padrão (DP) ou qualquer medida de dispersão disponível, unidade de medida, valor de p e o

número de animais nos grupos controle e tratado. Uma planilha do Excel foi elaborada para organizar os dados extraídos, juntamente com um conjunto de dados contendo os resultados dos ensaios controlados.

6.3.5 Avaliação do Risco de Viés dos Estudos Incluídos

A avaliação do risco de viés e da qualidade metodológica foi conduzida em nível de estudo individual, visando assegurar a integridade das inferências derivadas da metaregressão. O procedimento seguiu, de forma independente e padronizada os princípios conceituais estabelecidos pela ferramenta Cochrane RoB 2, com as adaptações necessárias ao contexto da experimentação animal e aos protocolos de mensuração de gases de efeito estufa. O julgamento foi sistematizado por meio de uma planilha de extração estruturada com perguntas sinalizadoras para cada domínio, garantindo que a categorização fosse baseada em critérios objetivos e reproduzíveis.

A análise contemplou três domínios críticos para a robustez da metanálise. No primeiro domínio, referente ao viés de seleção e alocação, avaliaram-se o rigor no relato da randomização e a homogeneidade dos grupos experimentais. Estudos que descreveram claramente o método de sorteio ou o uso de blocagem foram classificados como de baixo risco, enquanto relatos omissos sobre a sequência aleatória ou alocações por conveniência foram categorizados como de risco incerto ou alto risco, respectivamente.

No segundo domínio, focado no viés de aferição dos desfechos, o critério central foi a precisão instrumental e os protocolos utilizados para medir o ganho médio diário (GMD) e as emissões de metano (CH₄). Priorizou-se o emprego de técnicas validadas, como câmeras de respiração, técnica do gás traçador (SF₆) ou sistema GreenFeed, com exigência de descrição dos protocolos de calibração. Estudos com detalhamento insuficiente sobre a padronização das leituras ou fundamentados exclusivamente em equações preditivas foram classificados como de risco incerto.

Por fim, o terceiro domínio abordou o viés na análise e no relato dos resultados, verificando-se a adequação dos modelos estatísticos ao delineamento experimental proposto. Avaliou-se se a estrutura de variância foi

respeitada, incluindo o uso de efeitos aleatórios (animal e ensaio) e o relato de medidas de dispersão apropriadas para o nível de tratamento. Os resultados agregados das avaliações dos três domínios foram posteriormente sintetizados graficamente, permitindo a visualização dos resultados metodológicos de toda a base de dados.

6.3.6 Metanálise

Para avaliar os efeitos do ganho médio diário sobre a intensidade de emissão de CH₄, foi realizada uma metanálise com abordagem de metaregressão, utilizando dados provenientes de ensaios experimentais independentes conduzidos com ruminantes. A variável resposta foi a intensidade de emissão de metano, expressa como *log-response ratio* (lnRR), calculado a partir da razão entre a média do tratamento e a média do controle em cada estudo, o que permite a comparação de resultados obtidos sob diferentes condições experimentais e escalas de mensuração. A variância associada a cada lnRR foi calculada com base nos desvios-padrão e nos tamanhos amostrais dos grupos controle e tratamento, sendo utilizada para ponderar as estimativas no modelo, de modo que estudos com maior precisão tiveram maior influência nos resultados.

A variação no GMD, também expressa na forma de lnRR, foi incluída como variável explicativa contínua, visando investigar a relação entre o desempenho produtivo e a intensidade de emissão de metano. Adicionalmente, foram considerados como fatores categóricos a espécie animal (bovinos e ovinos) e o sistema produtivo (pastejo e confinamento), bem como as interações entre essas variáveis, permitindo avaliar se a associação entre desempenho e emissão de metano difere entre espécies e sistemas de produção. A heterogeneidade entre os estudos foi tratada por meio da inclusão de um efeito aleatório ao nível de ensaio, reconhecendo que diferenças inerentes aos experimentos podem influenciar os resultados.

As análises estatísticas foram conduzidas no ambiente R (R CORE TEAM, 2025), utilizando modelos de efeitos mistos ajustados pelo método da máxima

verossimilhança restrita (REML), conforme implementado no pacote *metafor* (VIECHTBAUER, 2010). A significância dos efeitos fixos e das interações foi avaliada por meio de testes do tipo Wald, baseados na estatística z , os quais verificam se os coeficientes estimados diferem significativamente de zero. Para cada parâmetro do modelo, foram estimados as respectivas incertezas (erro-padrão) e intervalos de confiança (IC 95%). A significância conjunta dos moderadores incluídos no modelo foi avaliada por meio do teste QM (teste de moderadores), que compara o modelo contendo as variáveis explicativas com um modelo nulo, sem moderadores. Adicionalmente, a heterogeneidade residual entre os estudos foi quantificada e testada pelo estatístico QE, permitindo verificar se parte da variabilidade observada permaneceu não explicada após a inclusão dos moderadores. Em todas as análises, adotou-se nível de significância de 5%.

Inicialmente, foi ajustado um modelo completo de metaregressão, com todas as variáveis explicativas de interesse e suas interações, com o objetivo de avaliar de forma abrangente os efeitos do GMD, da espécie animal e do sistema de produção sobre a intensidade de emissão de metano ($\ln RR$). Posteriormente, esse modelo serviu como base para a obtenção de um modelo final, apresentado na seção de resultados.

Modelo estatístico completo:

$$\ln RR_i = \beta_0 + \beta_1(\ln RR_{GMD_i}) + \beta_2(Espécie_i) + \beta_3(Sistema_i) + \beta_4(\ln RR_{GMD_i} \times Espécie_i) + \beta_5(\ln RR_{GMD_i} \times Sistema_i) + \beta_6(Espécie_i \times Sistema_i) + \beta_7(\ln RR_{GMD_i} \times Espécie_i \times Sistema_i) + \mu_{j[i]} + \varepsilon_i,$$

onde:

- i representa cada comparação tratamento–controle;
- $j[i]$ indica o ensaio j ao qual a comparação i pertence.

O termo $\mu_{j[i]}$ representa o efeito aleatório do ensaio, assumido como $\mu_{j[i]} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{Ensaio}^2)$, capturando a heterogeneidade entre ensaios. O erro

amostral ε_i é assumido como normalmente distribuído com variância conhecida V_i .

Descrição dos coeficientes:

- β_0 (intercepto): representa o lnRR médio da intensidade de emissão de metano para a categoria de referência (espécie e sistema de produção de referência), quando o lnRR do GMD é igual a zero.
- β_1 : representa o efeito do lnRR_GMD sobre o lnRR da intensidade de emissão de metano, indicando se aumentos relativos no desempenho produtivo estão associados à redução ou ao aumento da intensidade de emissão.
- β_2 : quantifica a diferença no lnRR da intensidade de emissão de metano entre espécies (por exemplo, ovinos em relação à espécie de referência), mantendo constantes os demais fatores.
- β_3 : representa o efeito do sistema de produção sobre o lnRR da intensidade de emissão de metano, em comparação ao sistema de referência.
- β_4 : modificação do efeito do GMD pela espécie.
- β_5 : modificação do efeito do GMD pelo sistema.
- β_6 : efeito conjunto entre espécie e sistema.
- β_7 : interação tripla entre desempenho produtivo, espécie e sistema.
- $\mu_{j[i]}$: efeito aleatório do ensaio.
 - ε_i : erro amostra.

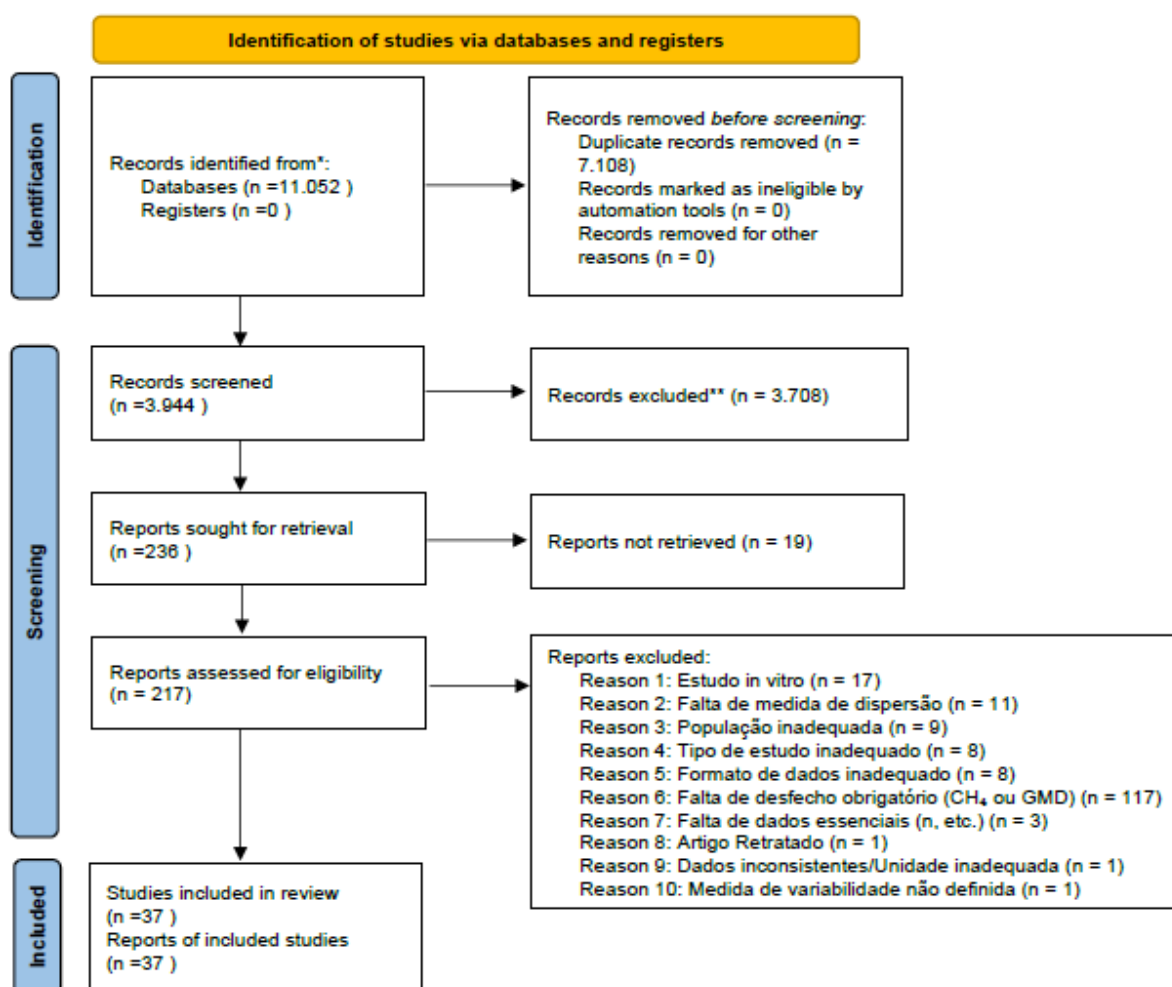
6.4 RESULTADOS

6.4.1 Estudos Selecionados

O processo de seleção dos estudos é apresentado no fluxograma PRISMA (Figura 1). A busca sistemática identificou 11.052 registros. Após a remoção de duplicatas, 3.944 registros foram triados por título e resumo, resultando na exclusão de 3.708 estudos.

Na avaliação em texto completo, 217 artigos foram analisados, dos quais 180 foram excluídos por não atenderem aos critérios de elegibilidade. Ao final, 37 artigos foram incluídos na síntese qualitativa e na avaliação do risco de viés, totalizando 151 estudos (grupos de tratamento) individuais.

Figura 1 - Fluxograma PRISMA 2020 detalhando o processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos na revisão sistemática



*O número de registros identificados em cada base de dados (PubMed, Scopus, etc.) está detalhado no Apêndice A. **Não foram utilizadas ferramentas de automação para a exclusão de registros na triagem.

6.4.2 Características dos Estudos Incluídos

As características descritivas dos 37 artigos selecionados para esse estudo estão sumarizadas na Tabela 4. Os dados apresentaram uma distribuição

global estratificada, com a predominância de pesquisas conduzidas no Hemisfério Sul. A América do Sul (Brasil e Uruguai) foi a região com maior representatividade, respondendo por 48,65% (n = 18) das publicações. A América do Norte (EUA) com a segunda região mais prevalente com 24,32% (n = 9), seguida pela Europa (Irlanda, Reino Unido, França e Portugal) com 16,22% (n = 6). A Ásia (China e Indonésia) contribuiu com 5,41% (n = 2) e a Oceania (Austrália) com 2,70% (n = 1). Em apenas 2,70% (n = 1) dos trabalhos a localização geográfica não pôde ser identificada com precisão.

Tabela 4 - Características principais dos 37 artigos incluídos na revisão sistemática

Característica Principal	Categoria/Agrupamento	Nº de Artigos (n)	Porcentagem (%)
Distribuição Geográfica	América do Sul (Brasil, Uruguai)	18	48,65%
	América do Norte (EUA)	9	24,32%
	Europa (Irlanda, Reino Unido, França, Portugal)	6	16,22%
	Ásia (China, Indonésia)	2	5,41%
	Oceania (Austrália)	1	2,70%
	África	0	0,00%
	Não especificado	1	2,70%
Espécie Animal	Bovinos	33	89,19%
	Ovinos	4	10,81%
Sistema de Produção	Confinamento	19	51,35%
	Pastejo	18	48,65%
Delineamento Experimental	Blocos Casualizados (DBC)	17	45,95%
	Inteiramente Casualizado (DIC)	14	37,84%

	Estudo Observacional (incl. Longitudinal)	5	13,51%
	Arranjo Fatorial	1	2,70%
	Não aplicável / Não especificado	0	0,00%
Método de Mensuração de CH₄	Técnica do SF ₆ (traçador)	17	45,95%
	Câmara de Respiração (incl. Gasmeter e PAC)	8	21,62%
	Sistema GreenFeed	8	21,62%
	Estimado (via Equação, AGV)	2	5,41%
	Outros Métodos (Laser, Analisador TEI)	2	5,41%
Total		37	100%

N = 37 artigos incluídos na análise. As porcentagens foram calculadas com base no número total de artigos. DBC = Delineamento em Blocos Casualizados; DIC = Delineamento Inteiramente Casualizado. SF₆ = Técnica do Gás Traçador Hexafluoreto de Enxofre; AGV = Ácidos Graxos Voláteis; PAC = Câmaras de Acumulação Portáteis; TEI = Analisador Thermo Environmental Instruments. A categoria "Outros Métodos" engloba técnicas como Laser Portátil e analisadores específicos.

A pesquisa indicou primeiramente bovinos de corte (*Bos taurus/indicus*), representando 89,19% (n = 33) dos artigos, enquanto ovinos foram o foco em 10,81% (n = 4) das publicações. Quanto ao sistema de produção, observou-se um equilíbrio entre os estudos, com 51,35% (n = 19) conduzidos em confinamento e 48,65% (n = 18) em sistemas a pastejo. O delineamento experimental mais comum foi o de blocos casualizados (DBC), presente em 45,95% (n = 17) dos artigos, seguido pelo delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 37,84% (n = 14). Estudos observacionais e longitudinais representaram 13,51% (n = 5) da amostra.

Houve variação na metodologia utilizada para quantificar a emissão de metano entérico (CH₄). A técnica do traçador SF₆ (hexafluoreto de enxofre) foi a mais prevalente, sendo utilizada em 45,95% (n = 17) dos artigos, refletindo sua

aplicabilidade em condições de pastejo. O uso de câmeras de respiração (incluindo calorimetria indireta e sistemas portáteis PAC) e o sistema de monitoramento automatizado GreenFeed foram reportados em 21,62% (n = 8) dos estudos cada. Métodos de estimativa indireta e outras técnicas (como laser portátil) representaram, somados, aproximadamente 10,8% da base de dados. Todos os artigos incluídos forneceram dados diretos ou indiretos de metano relacionados ao desempenho animal.

6.4.3 Avaliação do Risco de Viés

A avaliação da qualidade metodológica e do risco de viés (RoB) foi realizada individualmente para os 151 estudos (comparações entre tratamentos) contidos nos 37 artigos selecionados. Os resultados, agregados por domínio de viés, estão sintetizados na Figura 2.

O Domínio 1 (viés de seleção e alocação) constituiu a principal fonte de heterogeneidade qualitativa. Aproximadamente 56,7% (n = 86) dos estudos foram classificados como de baixo risco, apresentando descrições claras dos métodos de randomização. O risco incerto foi atribuído a 30,0% (n = 45) dos casos, predominantemente devido a falhas no relato da geração da sequência aleatória. Os 13,3% (n = 20) restantes foram categorizados como de alto risco, em função do uso declarado de seleção por conveniência ou alocação não aleatória.

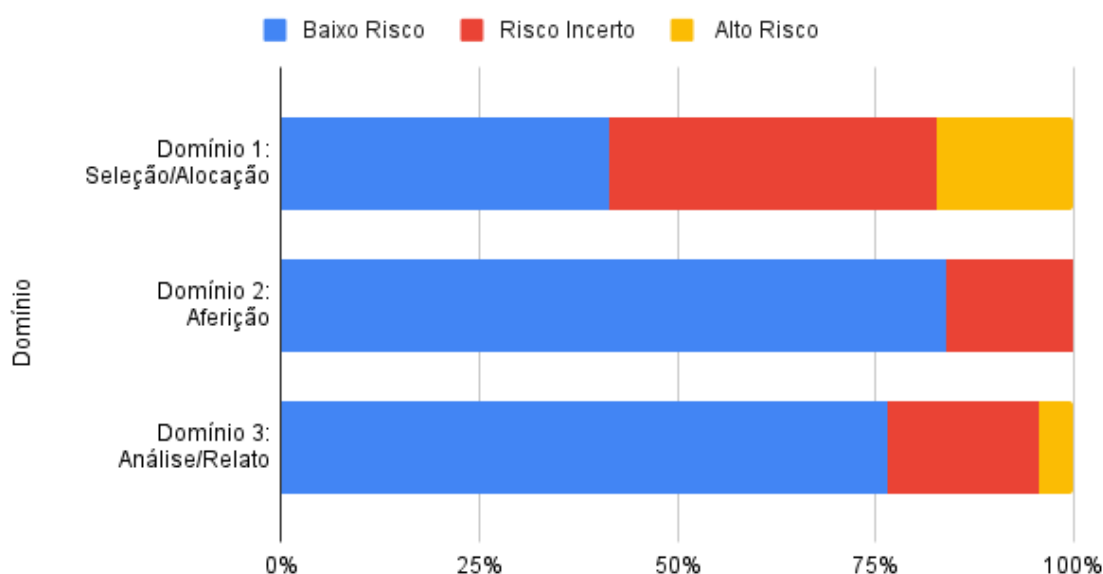
O Domínio 2 (viés de aferição dos desfechos) apresentou o maior grau de robustez metodológica na base de dados. A maioria dos estudos (91,3%, n = 138) foi classificada como de baixo risco, fundamentada no uso de ferramentas de mensuração objetivas e validadas para o GMD (balanças eletrônicas com protocolos de jejum) e para o CH₄ (Câmaras, SF₆ ou GreenFeed). O risco incerto (8,7%, n = 13) foi restrito a estudos com detalhamento insuficiente dos protocolos de calibração ou uso exclusivo de equações preditivas. Não foram identificados estudos com alto risco para este domínio.

No Domínio 3 (viés de análise e relato), 76,0% (n = 115) dos estudos demonstraram baixo risco, utilizando modelos de efeitos mistos ou análise de variância que incorporaram adequadamente a estrutura do delineamento

experimental (efeitos de bloco e animal). O risco incerto foi observado em 24,0% (n = 36) das comparações, relacionado a descrições estatísticas incompletas ou ausência de medidas de erro apropriadas para o nível de tratamento.

Figura 2- Avaliação do risco de viés dos estudos incluídos (n = 151) de 37 artigos selecionados

Distribuição de risco por domínios

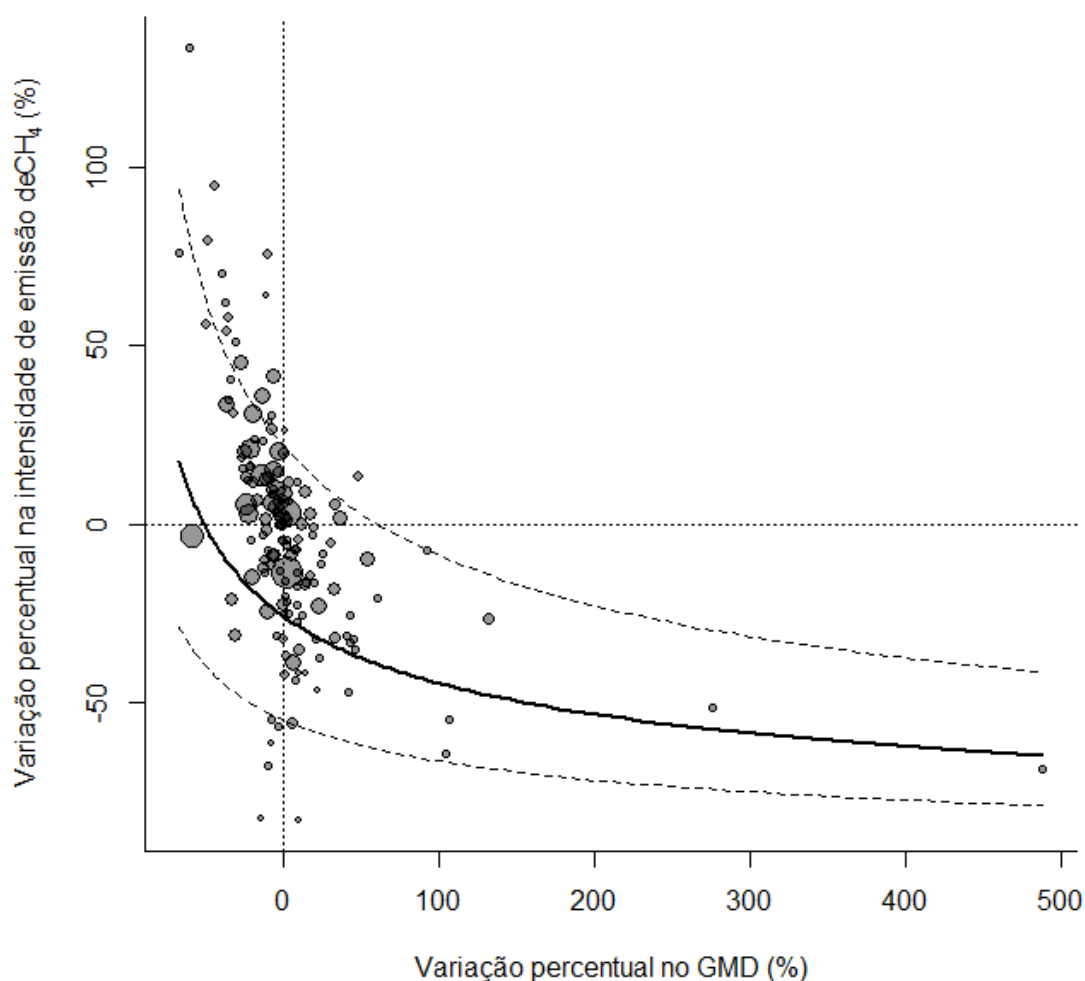


As barras representam os três domínios de viés avaliados: (1) Seleção e Alocação; (2) Aferição dos Desfechos; e (3) Análise e Relato. As cores indicam a proporção de estudos classificados em cada categoria de risco: Baixo Risco (verde), Risco Incerto (amarelo) e Alto Risco (vermelho).

6.4.4 Metanálise

A metaregressão aplicada sobre a globalidade dos dados mostrou que aumentos relativos no desempenho produtivo estão associados a reduções proporcionais na intensidade de emissão de CH₄ (Figura 3), com a mitigação de aproximadamente 4% na intensidade de emissão de CH₄ para cada 10 unidades percentuais de aumento no GMD.

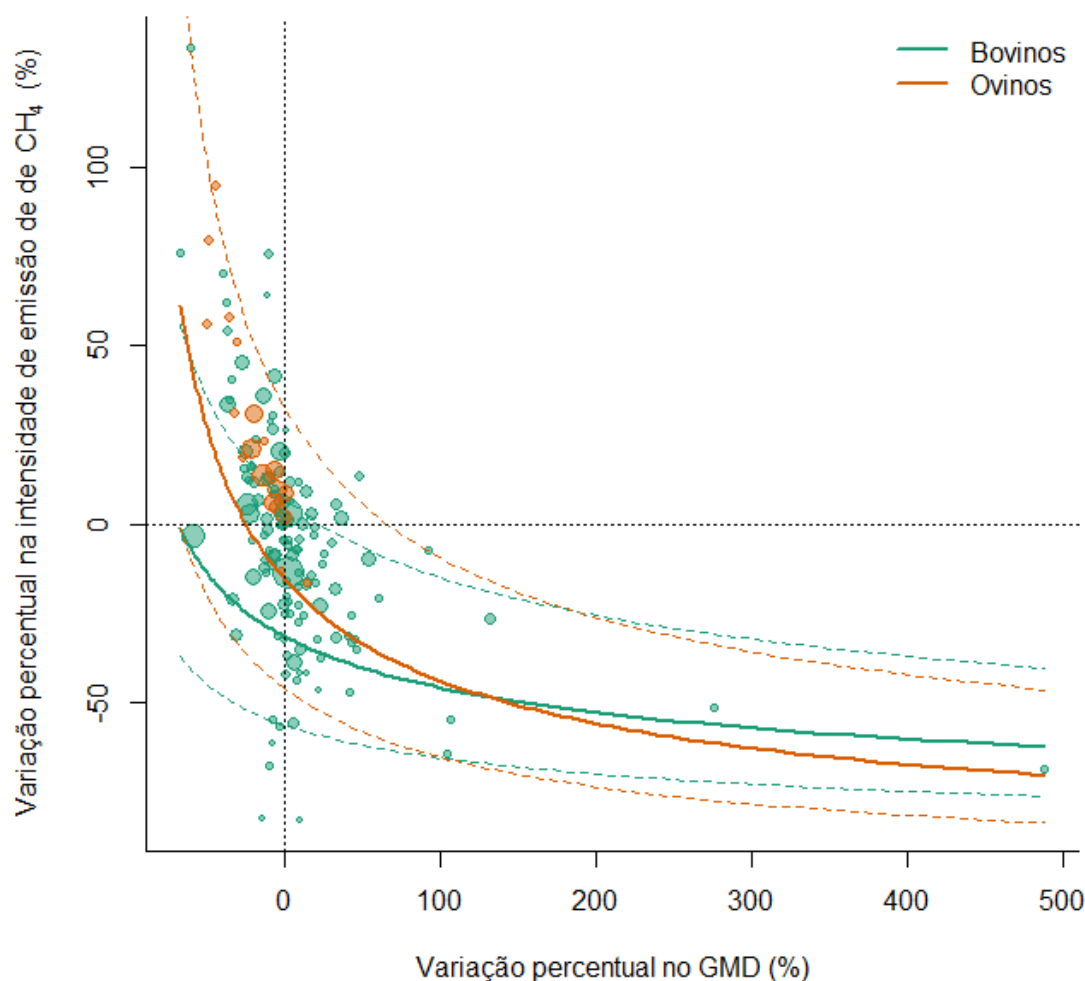
Figura 3-Relação entre a variação percentual do ganho médio diário (GMD) e a variação percentual da intensidade de emissão de metano (CH₄)



Pontos representam comparações individuais entre tratamento e controle, com tamanho proporcional ao peso estatístico. A linha contínua indica a metaregressão ajustada e as linhas tracejadas o intervalo de confiança de 95% ($n = 151$; $\beta = -0,418$; $P < 0,001$).

Os ovinos apresentaram maior redução na intensidade de emissão à medida que aumenta o GMD relativo ($\beta = -0,59$; $P = 0,017$) quando comparados aos bovinos ($\beta = -0,34$; $P < 0,001$) (Figura 4). Além disso, ovinos apresentaram, em média, maior intensidade de emissão relativa quando comparados aos bovinos para o mesmo nível de ganho.

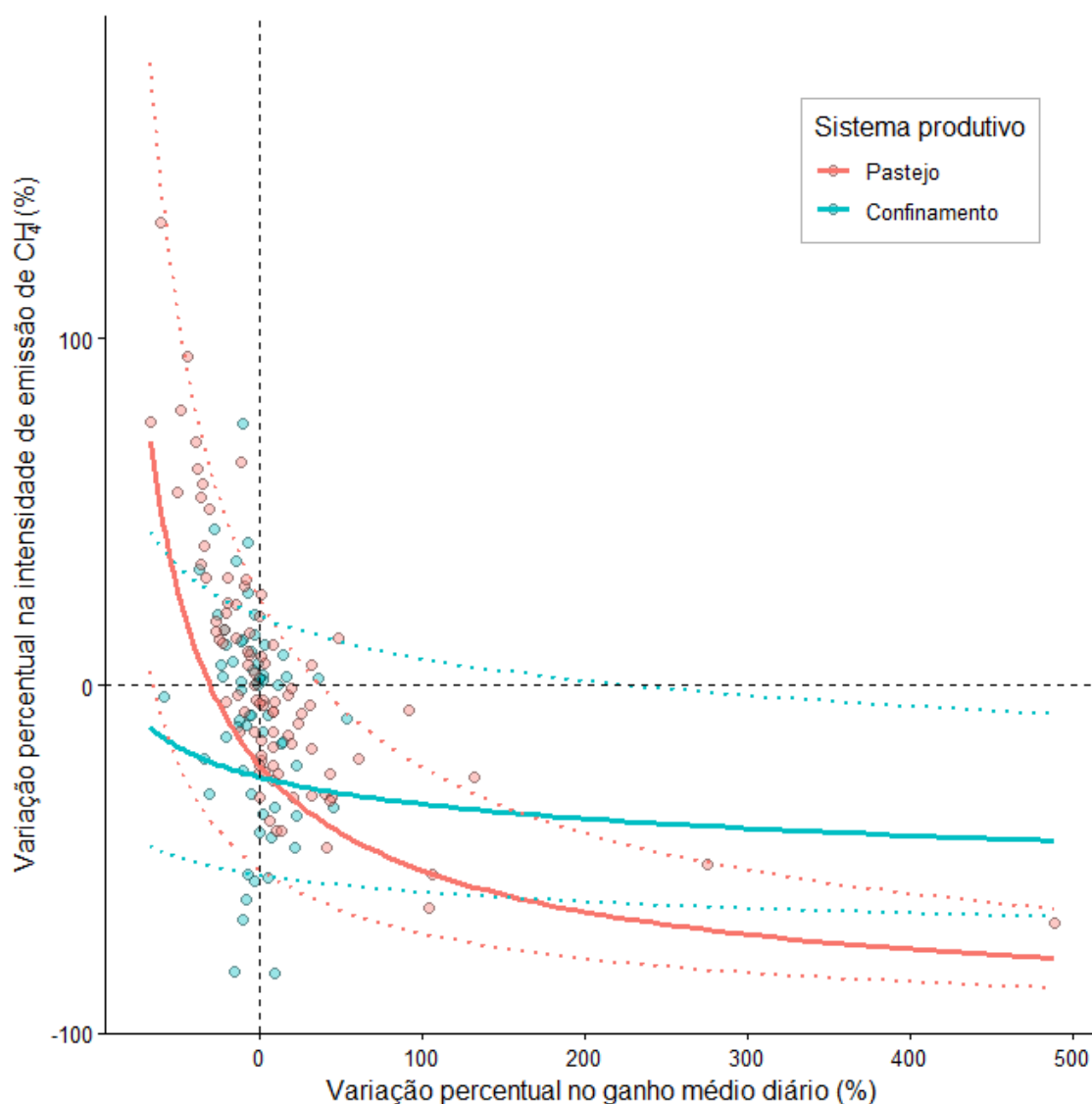
Figura 4 - Relação entre a variação percentual do ganho médio diário (GMD) e a variação percentual da intensidade de emissão de metano (CH₄) em bovinos e ovinos



Pontos representam comparações individuais, com tamanho proporcional ao peso estatístico. As linhas contínuas indicam as meta-regressões ajustadas por espécie e as linhas tracejadas os intervalos de confiança de 95%. (Bovinos: $\beta = -0,34$; $P < 0,001$; Ovinos: $\beta = -0,59$; $P = 0,017$)

A comparação entre sistemas produtivos (Figura 5) evidenciou uma interação significativa entre eficiência produtiva e sistema de produção, com reduções mais acentuadas na intensidade de emissão associadas ao aumento do GMD em sistemas de pastejo.

Figura 5-Relação entre a variação percentual do ganho médio diário (GMD) e a variação percentual da intensidade de emissão de metano (CH_4) em ruminantes sob pastejo ou confinamento



Pontos representam comparações individuais entre tratamento e controle de cada estudo. As linhas representam as previsões do modelo para os sistemas em pastejo e confinamento.

A análise do conjunto de dados, utilizando o modelo completo (Tabela 5), confirmou o efeito do GMD sobre a intensidade de emissão de metano, bem como a diferença entre as espécies ($P < 0,001$). Contudo, as interações entre GMD $\times$ espécie ($P = 0,418$), os efeitos conjuntos da espécie $\times$ sistema produtivo ($P = 0,199$) e a tripla interação entre o desempenho produtivo, espécie e sistema ($P = 0,766$) não apresentaram efeito significativo.

Tabela 5 - Resultados do modelo completo de metaregressão para a intensidade de emissão de metano, expressos em variação percentual

Efeito	Estimativa (%) ¹	EP (%) ²	IC 95%	p-valor
Intercepto	-32,0	26,4	-57,1 a 7,7	0,100
lnRR do GMD	-44,8	4,9	-49,8 a -39,4	<0,001
Espécie (Ovinos)	+28,9	4,1	+19,2 a +39,4	<0,001
Sistema (Confinamento)	+2,4	2,0	-1,5 a +6,4	0,235
lnRR_GMD × Espécie	+10,7	13,3	-13,4 a +41,5	0,418
lnRR_GMD × Sistema	+56,9	6,3	+39,2 a +77,0	<0,001
Espécie × Sistema	-7,8	6,1	-18,7 a +4,4	0,199
lnRR_GMD × Esp × Sistema	-25,7	171,5	-89,6 a +430,0	0,766

¹ Os coeficientes foram transformados da escala logarítmica (lnRR) para variação percentual, utilizando $(\exp(\beta) - 1) \times 100$. O intercepto refere-se à condição de referência (bovinos em pastejo, lnRR do GMD = 0). Valores negativos indicam redução da intensidade de emissão, enquanto valores positivos indicam aumento, sempre em relação ao grupo de referência (bovinos a pasto). A significância estatística dos efeitos foi avaliada pelo teste Wald, considerando nível de significância de 5%.

² erro-padrão.

O modelo final utilizado para a metaregressão desconsiderou os efeitos das interações que não apresentaram efeito significativo (Tabela 6; Figura 6). Os resultados confirmam que o efeito do GMD sobre a redução da intensidade de emissão foi significativamente menor no confinamento do que no pastejo (interação GMD × sistema: $P < 0,001$). Além disso, para um mesmo GMD não houve diferença no nível médio de intensidade de emissão de CH₄ entre sistemas ($P = 0,446$). Finalmente, ovinos apresentaram em média maior intensidade de emissão que bovinos (efeito espécie: $P < 0,001$), independentemente do sistema produtivo.

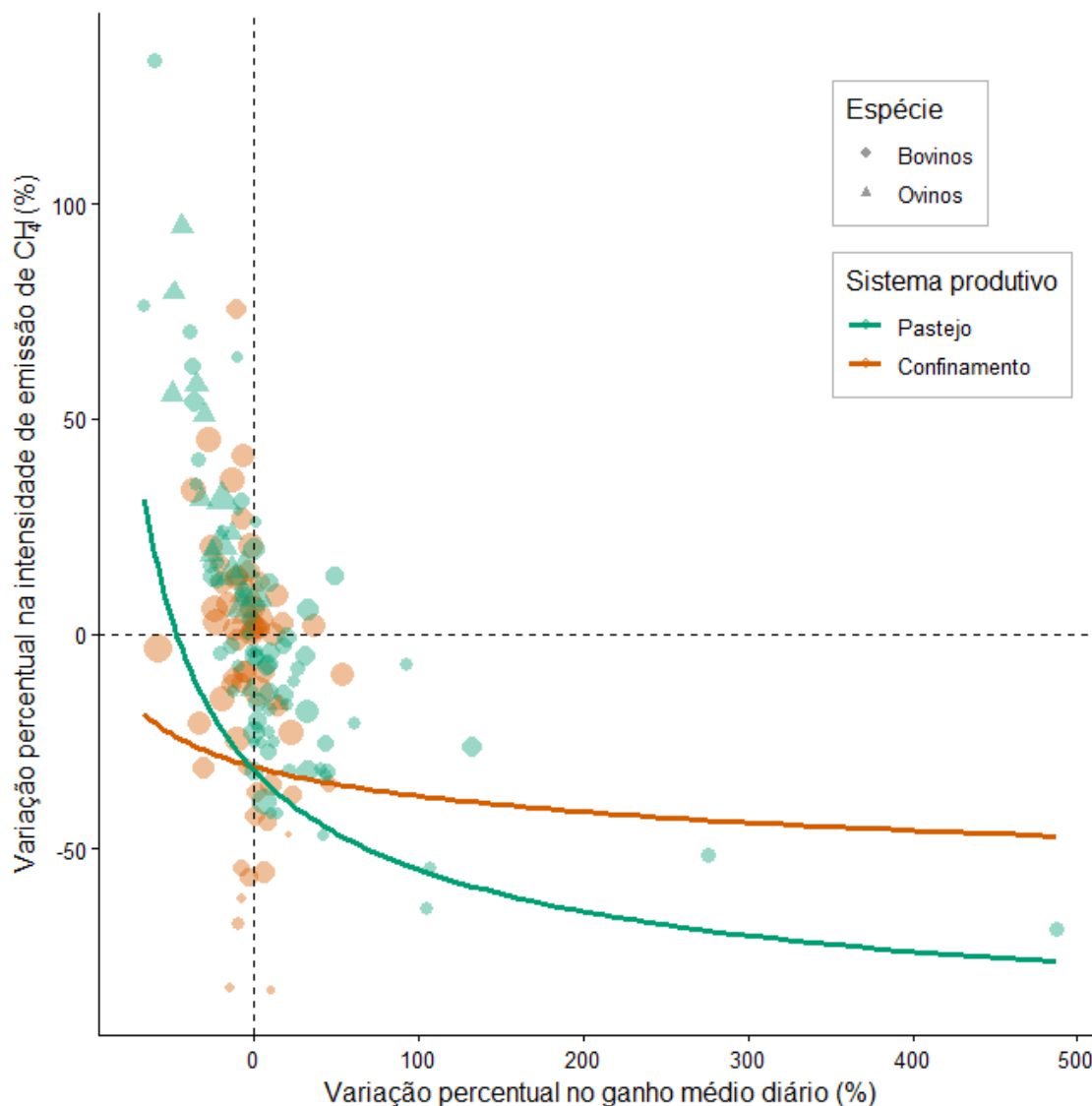
Tabela 6 -Resultados do modelo final de metaregressão para a intensidade de emissão de metano, expressos em variação percentual

Efeito	Estimativa (%)	EP (%)	IC 95% (%)	p-valor
Intercepto	-31,8	18,6	-56,8 a 7,7	0,101
lnRR do GMD	-44,9	4,1	-49,2 a -40,2	<0,001
Sistema (Confinamento)	1,3	1,8	-2,1 a 4,9	0,446
Espécie (Ovinos)	23,4	2,9	17,5 a 29,7	<0,001
lnRR do GMD × Sistema (Confinamento)	56,1	6,4	39,7 a 74,5	<0,001

¹Os coeficientes foram transformados da escala logarítmica (lnRR) para variação percentual, utilizando $(\exp(\beta) - 1) \times 100$. O intercepto refere-se à condição de referência (bovinos em pastejo, lnRR do GMD = 0). Valores negativos indicam redução da intensidade de emissão, enquanto valores positivos indicam aumento, sempre em relação ao grupo de referência (bovinos a pasto). A significância estatística dos efeitos foi avaliada pelo teste Wald, considerando nível de significância de 5%.

² erro-padrão.

Figura 6 -Metaregressão entre a variação percentual no ganho médio diário (GMD) e a variação percentual na intensidade de emissão de metano (CH_4)



Os pontos representam estimativas individuais dos estudos, com tamanho proporcional ao peso inverso da variância. As linhas correspondem às previsões do modelo de metaregressão para os sistemas produtivos de pastejo e confinamento. As linhas tracejadas indicam ausência de efeito (0%).

6.5 DISCUSSÃO

A condução de uma revisão sistemática com metanálise (SR-MA) é um processo rigoroso que exige transparência metodológica, não apenas na síntese quantitativa dos resultados, mas também na avaliação crítica da arquitetura da

base de evidências disponível (Page et al., 2021; Ferreira et al., 2022). Esta seção discute as implicações das características dos 37 artigos (compreendendo 151 estudos) incluídos e a avaliação do risco de viés (RoB), contextualizando a validade e a aplicabilidade da subsequente síntese quantitativa.

6.5.1 O Panorama da Pesquisa: Caracterização e Lacunas

O processo de seleção PRISMA (Figura 1) demonstrou um desafio comum em revisões sistemáticas na área das ciências agrárias: partindo de uma busca ampla, apenas 37 artigos atenderam aos rigorosos critérios de inclusão. A principal razão para a exclusão na fase de texto completo foi a falta de dados quantitativos essenciais, notadamente a ausência de medidas de dispersão (DP ou EPM) ou a falha em relatar ambos os desfechos primários (GMD e CH₄). Esta triagem rigorosa foi essencial para garantir que apenas dados adequados para a metanálise fossem incluídos (FERREIRA et al., 2022; AZEVEDO et al., 2024).

A análise das características dos 37 artigos incluídos revela vieses geográficos e metodológicos na literatura existente. A pesquisa é dominada pela América do Sul (48,6%) e América do Norte (24,3%), refletindo os esforços de pesquisa em grandes nações produtoras de carne bovina, como Brasil e Estados Unidos. Embora esta concentração forneça dados robustos para esses contextos, ela também destaca uma escassez de dados *in vivo* de outras regiões de produção significativas, como a África (0,0%), limitando a generalização dos achados para sistemas de produção naqueles continentes.

A predominância de estudos com bovinos de corte (89,2%) sobre ovinos (10,8%) era esperada, dada a magnitude econômica e a contribuição absoluta dos bovinos para as emissões globais (GERBER et al., 2013). Contudo, isso demonstra uma lacuna relativa no entendimento das emissões de pequenos ruminantes.

Houve um equilíbrio entre os artigos conduzidos em confinamento (51,3%) e em sistemas a pastejo (48,7%). Esta distribuição é significativa, considerando a complexidade logística e o custo associado à medição precisa de emissões e consumo de animais em pastejo (SMITH et al., 2022; VARGAS et al., 2022). A extrapolação de resultados de confinamento para sistemas *pastoris* é

problemática (VARGAS et al., 2022), pois as dietas baseadas em forragem com elevado teor de fibra, típicas do pastejo, alteram fundamentalmente a fermentação ruminal em direção a maiores rendimentos de metano (CH_4) (ARCHIMÈDE et al., 2011; ZUBIETA et al., 2021). A própria definição de "pastejo" abrange uma enorme variabilidade, o que introduz uma heterogeneidade considerável que justifica a análise de subgrupos.

A diversidade de métodos de mensuração de CH_4 também é uma fonte crítica de heterogeneidade (HRISTOV et al., 2018). A técnica do traçador SF_6 (46,0%) foi a mais comum, e se alinha com a inclusão de estudos em pastejo, onde esta técnica é frequentemente a única viável (THOMPSON e ROWNTREE, 2020; VARGAS et al., 2022). As Câmaras de Respiração (21,6%) e o sistema GreenFeed (21,6%) foram amplamente utilizados. No entanto, uma parcela menor dos artigos utilizou métodos de estimativa ou técnicas alternativas (10,8%), que, embora práticos, podem introduzir incertezas na quantificação.

6.5.2 Qualidade Metodológica e Implicações do Risco de Viés

A avaliação do risco de viés (RoB) dos 151 estudos (Figura 2) fornece o contexto crítico para interpretar a confiabilidade da evidência. O Domínio 2 (Aferição dos Desfechos) apresentou a maior robustez. Com 91,3% dos estudos classificados como de baixo risco, podemos ter alta confiança de que as variáveis primárias (GMD e CH_4) foram, em sua maioria, mensuradas com ferramentas objetivas e aceitas (balanças, câmaras, SF_6 , GreenFeed), conforme recomendado (SMITH et al., 2022; AZEVEDO et al., 2024). O risco incerto (8,7%) foi atribuído principalmente a estudos com descrições incompletas dos protocolos de aferição.

Em contraste, o Domínio 1 (Seleção e Alocação) permanece como um ponto de atenção metodológica. Cerca de 56,7% dos estudos apresentaram baixo risco. A proporção de risco incerto (30,0%) e alto risco (13,3%) é relevante. O risco incerto deve-se, em grande parte, a relatos insuficientes, onde os autores utilizam o termo "randomizado" sem descrever o método de geração da sequência, impedindo a avaliação da ocultação da alocação (FERREIRA et al.,

2022). O alto risco foi atribuído ao uso de seleção por conveniência, o que introduz um viés de seleção fundamental (AZEVEDO et al., 2024).

O Domínio 3 (Análise e Relato) teve uma avaliação em maior parte positiva (76,0% de baixo risco). Isso sugere que a maioria dos estudos utilizou modelos estatísticos apropriados para seus delineamentos (ex: contabilizando blocos ou animal como efeito aleatório). No entanto, o risco incerto registrado em 24,0% dos estudos representa casos em que a análise ou o relato falharam em descrever detalhadamente a estrutura do delineamento ou as medidas de erro, o que pode mascarar a precisão real dos tratamentos.

6.5.3 Efeito do desempenho animal sobre a intensidade de emissão de CH₄

A redução de 4% na intensidade de emissão de CH₄, para cada 10% de incremento no GMD corrobora a hipótese do "efeito de diluição de manutenção". Os resultados obtidos sob a ótica da metaregressão evidenciam que o desempenho produtivo não é apenas um indicador zootécnico, mas uma métrica preditiva da pegada de carbono, onde o aumento do fluxo de nutrientes para tecidos produtivos otimiza o uso da energia bruta ingerida. Essa dinâmica bioenergética é amplamente sustentada por Beauchemin et al. (2022), que descrevem a intensificação produtiva como uma das estratégias mais eficazes para a mitigação de gases de efeito estufa (GEE), uma vez que animais de alto desempenho direcionam uma fração superior da energia metabolizável para a síntese de tecidos, reduzindo a participação relativa das exigências basais de sobrevivência no balanço total. De forma complementar, Thompson et al. (2021) observaram que o incremento no plano nutricional promove alterações na cinética de passagem ruminal. O aumento do consumo acelera o fluxo de digesta, diminuindo o tempo de permanência das partículas no rúmen e, assim limitando a extensão da fermentação da fração fibrosa pelos microrganismos metanogênicos. Esse ajuste favorece rotas bioquímicas que culminam em maior síntese de propionato, um sumidouro natural de elétrons que compete diretamente com a via da metanogênese (PALANGI et al., 2022).

A interação significativa entre GMD e sistema de produção indica que a transição de um baixo desempenho para um alto desempenho

em pastagens gera um benefício ambiental marginal superior ao observado em confinamento. Isso sugere que o pastejo, historicamente associado a maiores intensidades de emissão, possui maior "espaço de mitigação" por meio da intensificação do manejo e da qualidade da forragem, igualando-se em intensidade ao confinamento quando os níveis de GMD são equivalentes. Conforme defendido por Lobo (2023) em sistemas de terminação de bovinos Nelore, a intensificação das pastagens permite a diluição dos "custos fixos" de metano associados à manutenção biológica do rebanho por unidade de produto gerado. Molossi et al. (2020) reforçam essa premissa ao demonstrarem que a melhoria na qualidade da dieta, via suplementação estratégica ou adubação de pastos, é capaz de dissociar o crescimento da produção de carne bovina do aumento linear das emissões, validando o papel do sistema pastoril como um ambiente de alta resiliência e potencial mitigador quando bem manejado. A convergência das intensidades entre sistemas em altos níveis de ganho indica que a eficiência biológica ruminal torna-se o fator determinante, sobrepondo-se às diferenças estruturais das dietas baseadas em forragem *versus* confinamento (ARCHIMÈDE et al., 2011; VARGAS et al., 2022).

A maior intensidade de emissão de CH₄ em ovinos frente a bovinos (para o mesmo nível de ganho) e a maior sensibilidade destes às variações de GMD indicam que as estratégias de mitigação não são universalmente transferíveis entre ruminantes. A ausência de interações triplas significativas sugere que essas diferenças entre espécies são intrínsecas e persistentes, independentemente do sistema de terminação adotado. Tais disparidades podem ser atribuídas a diferenças anatômicas, fisiológicas e na microbiota ruminal. Ovinos apresentam, proporcionalmente, uma maior taxa de retenção seletiva de partículas e uma fisiologia digestiva distinta que pode predispor a maiores produções de metano por quilograma de ganho de peso (PATRA, 2014). Savian et al. (2018) destacam que, embora o manejo rotativo possa reduzir a intensidade de emissão em ovinos via melhoria na seleção da dieta, a magnitude da resposta ao incremento de GMD é mais pronunciada nesses ruminantes devido à sua maior exigência energética relativa. Assim, a modelagem de mitigação deve considerar a biologia específica da espécie, reconhecendo que o "espaço de eficiência" para ovinos exige metas de ganho de peso ainda mais

ambiciosas para atingir patamares de pegada de carbono comparáveis aos dos bovinos de corte.

6.6 CONCLUSÕES

A intensificação produtiva atua como uma ferramenta de mitigação indireta massiva, particularmente em sistemas de base pastoril. Neste sentido, o foco global para redução do impacto ambiental da pecuária deve priorizar a transição de animais de baixo desempenho para patamares superiores de GMD, onde a eficiência da fermentação ruminal é maximizada por unidade de produto gerado.

REFERÊNCIAS

- AIKING, H. Protein production: planet, profit, plus people? **American Journal of Clinical Nutrition**, v. 100, supl. 1, p. 483S–489S, 2014.
- ARCHIMÈDE, H. et al. Comparison of methane production between C3 and C4 grasses and legumes. **Animal Feed Science and Technology**, v. 166–167, p. 59–64, 2011.
- AZEVEDO, L. A. et al. Strategies to alleviate heat stress on performance and physiological parameters in feedlot-finished cattle under heat stress conditions: A systematic review-meta-analysis. **Journal of Thermal Biology**, v. 119, p. 103798, 2024.
- BALDUZZI, S.; RÜCKER, G.; SCHWARZER, G. How to perform a meta-analysis with R: a practical tutorial. **Evidence-Based Mental Health**, v. 22, n. 4, p. 153-160, 2019.
- BEAUCHEMIN, K. A. et al. Invited review: Current enteric methane mitigation options. **Journal of Dairy Science**, v. 105, n. 12, p. 9297–9326, 2022.
- BEAUCHEMIN, K. A. et al. Nutritional management for enteric methane abatement: A review. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 48, n. 2, p. 21–27, 2008.
- BEAUCHEMIN, K. A. et al. Review: Fifty years of research on rumen methanogenesis: lessons learned and future challenges for mitigation. **Animal**, v. 14, n. s1, p. s2–s16, 2020.
- CARDOSO-GUTIERREZ, E. et al. Effect of tannins from tropical plants on methane production from ruminants: A systematic review. **Veterinary and Animal Science**, v. 14, p. 100214, 2021.
- CAZZULI, F. et al. Beef Cattle Grazing Native Grasslands May Follow Three Different Supplement Response Patterns. **Grasses**, v. 2, n. 3, p. 168-184, 2023.
- D'AUREA, A. P. et al. Mitigating Greenhouse Gas Emissions from Beef Cattle Production in Brazil through Animal Management. **Sustainability**, v. 13, n. 13, p. 7207, 2021.
- DERSIMONIAN, R.; LAIRD, N. Meta-analysis in clinical trials. **Controlled Clinical Trials**, v. 7, n. 3, p. 177–188, 1986.
- DOREAU, M. et al. 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.

DUVAL, S.; TWEEDIE, R. Trim and Fill: A Simple Funnel-Plot–Based Method of Testing and Adjusting for Publication Bias in Meta-Analysis. **Biometrics**, v. 56, n. 2, p. 455–463, 2000.

EGGER, M. et al. Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test. **BMJ**, v. 315, n. 7109, p. 629–634, 1997.

FERREIRA, G. C. M. et al. Prevalence of bovine *Babesia* spp., *Anaplasma marginale*, and their co-infections in Latin America: Systematic review-meta-analysis. **Ticks and Tick-borne Diseases**, v. 13, n. 5, p. 101967, 2022.

GERBER, P. J. et al. **Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities**. Rome: FAO, 2013.

HAMMOND, K. J. et al. 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.

HIGGINS, J. P. T. et al. Measuring inconsistency in meta-analyses. **BMJ**, v. 327, n. 7414, p. 557–560, 2003.

HILL, J. et al. Measuring methane production from ruminants. **Trends in Biotechnology**, v. 34, n. 1, p. 26–35, 2016.

HRISTOV, A. N. et al. SPECIAL TOPICS—Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. **Journal of Animal Science**, v. 91, n. 11, p. 5045–5069, 2013a.

HRISTOV, A. N. et al. Symposium review: Uncertainties in enteric methane inventories, measurement techniques, and prediction models. **Journal of Dairy Science**, v. 101, n. 7, p. 6655–6674, 2018.

JANSSEN, P. H. Influence of hydrogen on rumen methane formation and fermentation balances through microbial growth kinetics and fermentation thermodynamics. **Animal Feed Science and Technology**, v. 160, n. 1–2, p. 1–22, 2010.

JOHNSON, K. A.; JOHNSON, D. E. Methane emissions from cattle. **Journal of Animal Science**, v. 73, n. 8, p. 2483–2492, 1995.

JONKER, A. et al. Methane and carbon dioxide emissions from lactating dairy cows grazing mature ryegrass/white clover or a diverse pasture comprising ryegrass, legumes and herbs. **Animal Production Science**, v. 59, n. 6, p. 1063–1069, 2018.

LLONCH, P. et al. Changes in feed intake during isolation stress in respiration chambers may impact methane emissions assessment. **Animal Production Science**, v. 58, n. 6, p. 1011–1016, 2018.

LOBO, A. A. G. **Intensidade de emissão de metano, fermentação e dinâmica ruminal de bovinos Nelore em sistemas de pastejo intensificado e integrado nas diferentes estações do ano**. 2023. 176 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2023.

LOMBARDI, B. et al. Methane and nitrous oxide emissions from dung patches deposited by grazing cattle supplemented with maize grain. **Animal Feed Science and Technology**, v. 279, p. 115029, 2021.

MCMANUS, C. et al. Dynamics of cattle production in Brazil. **PLOS ONE**, v. 11, n. 1, e0147138, 2016.

MOLOSSI, L. et al. Improve Pasture or Feed Grain? Greenhouse Gas Emissions, Profitability, and Resource Use for Nelore Beef Cattle in Brazil's Cerrado and Amazon Biomes. **Animals**, v. 10, n. 8, p. 1386, 2020.

MYHRE, G. et al. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: STOCKER, T. F. et al. (Eds.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 659–740.

OUZZANI, M. et al. Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. **Systematic Reviews**, v. 5, n. 1, p. 210, 2016.

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n71, 2021.

PALANGI, V. et al. Strategies to Mitigate Enteric Methane Emissions in Ruminants: A Review. **Sustainability**, v. 14, n. 20, p. 13229, 2022.

PATRA, A. K. A meta-analysis of the effect of dietary fat on enteric methane production, digestibility and rumen fermentation in sheep, and a comparison of these responses between cattle and sheep. **Livestock Science**, v. 162, p. 97–103, 2014.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

RAMIN, M.; HUHTANEN, P. Development of equations for predicting methane emissions from ruminants. **Journal of Dairy Science**, v. 96, n. 4, p. 2476–2493, 2013.

ROCKSTRÖM, J. et al. A safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, n. 7263, p. 472–475, 2009.

SAVIAN, J. V. et al. Rotatinuous stocking: A grazing management innovation that has high potential to mitigate methane emissions by sheep. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 602–608, 2018.

- SMITH, P. E. et al. Enteric methane research and mitigation strategies for pastoral-based beef cattle production systems. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 9, p. 958340, 2022.
- STERNE, J. A. C. et al. RoB 2: a revised tool for assessing risk of bias in randomised trials. **BMJ**, v. 366, l4898, 2019.
- THOMPSON, L. R. et al. Impact of forage diversity on forage productivity, nutritive value, beef cattle performance, and enteric methane emissions. **Journal of Animal Science**, v. 99, n. 12, skab326, 2021.
- THOMPSON, L. R.; ROWNTREE, J. E. Invited Review: Methane sources, quantification, and mitigation in grazing systems. **Applied Animal Science**, v. 36, n. 5, p. 556–573, 2020.
- UNGERFELD, E. M. Shifts in metabolic hydrogen sinks in the methanogenesis-inhibited ruminal fermentation: A meta-analysis. **Frontiers in Microbiology**, v. 6, p. 37, 2015.
- VAN ZANTEN, H. H. E. et al. Defining a land boundary for sustainable livestock consumption. **Global Change Biology**, v. 24, n. 9, p. 4185–4194, 2018.
- VARGAS, J. et al. Feeding Strategies to Mitigate Enteric Methane Emission from Ruminants in Grassland Systems. **Animals**, v. 12, n. 9, p. 1132, 2022.
- VIECHTBAUER, W. Conducting meta-analyses in R with the metafor package. **Journal of Statistical Software**, v. 36, n. 3, p. 1–48, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i03>.
- ZUBIETA, Á. S. et al. Does grazing management provide opportunities to mitigate methane emissions by ruminants in pastoral ecosystems? **Science of The Total Environment**, v. 754, p. 142029, 2021.

ANEXO A: BASES DE DADOS E ESTRATÉGIAS DE BUSCA

Database	Search strategy	Results Feb 02 nd 2025
Medline / PubMed	("Cattle"[MeSH Terms] OR "cattle*"[Title/Abstract] OR "Cow"[Title/Abstract] OR "Cows"[Title/Abstract] OR "Bos indicus"[Title/Abstract] OR "zebu*"[Title/Abstract] OR "Taurus"[Title/Abstract] OR "Bos grunniens"[Title/Abstract] OR "Yak"[Title/Abstract] OR "Yaks"[Title/Abstract] OR "Holstein"[Title/Abstract] OR "bovine"[Title/Abstract] OR "beef"[Title/Abstract] OR "calf"[Title/Abstract] OR "calves"[Title/Abstract] OR "steer*"[Title/Abstract] OR "heifer*"[Title/Abstract] OR "bull"[Title/Abstract] OR "bulls"[Title/Abstract] OR "ox"[Title/Abstract] OR "oxen"[Title/Abstract] OR "bullock*"[Title/Abstract] OR ("grazing"[Title/Abstract] OR "foraging"[Title/Abstract] OR "feed crop*"[Title/Abstract] OR "fodder crop*"[Title/Abstract] OR ((("pastur*"[Title/Abstract] OR "herbage"[Title/Abstract] OR "forage"[Title/Abstract]) AND "allowance*"[Title/Abstract]) OR "sward height"[Title/Abstract] OR "canopy height"[Title/Abstract])) AND ("Body Weight"[MeSH Terms] OR "weight*"[Title/Abstract] OR "weighing"[Title/Abstract] OR "daily gain"[Title/Abstract] OR ((("dry matter"[Title/Abstract] OR "herbage"[Title/Abstract] OR "pasture"[Title/Abstract] OR "forage"[Title/Abstract] OR "feed"[Title/Abstract]) AND "intake"[Title/Abstract]) OR "DMI"[Title/Abstract] OR "ADG"[Title/Abstract]) AND ("Methane"[MeSH Terms] OR "methane emission*"[Title/Abstract] OR "methane production"[Title/Abstract] OR "methane yield"[Title/Abstract] OR "methane intensity"[Title/Abstract] OR "CH4"[Title/Abstract] OR "Ym"[Title/Abstract]))	1063
Scopus	((TITLE-ABS-KEY (cattle* OR cow OR cows OR "Bos indicus" OR zebu* OR taurus OR "Bos grunniens" OR yak OR yaks OR holstein OR bovine OR beef OR calf OR calves OR steer* OR heifer* OR bull OR bulls OR ox OR oxen OR bullock*)) OR (TITLE-ABS-KEY (grazing OR foraging OR "feed crop*" OR "fodder crop*" OR ((pastur* OR herbage OR forage) AND allowance*) OR "sward height" OR "canopy height"))) AND (TITLE-ABS-KEY ("methane emission*" OR "methane production" OR "methane yield" OR "methane intensity" OR "CH4" OR "Ym")) AND (TITLE-ABS-KEY (weight* OR weighing OR "daily gain" OR (("dry matter" OR herbage OR pasture OR forage OR feed) AND intake) OR "DMI" OR "ADG")))	2025
Web of Science	TS=(cattle* OR Cow OR Cows OR "Bos indicus" OR Zebu* OR Taurus OR "Bos grunniens" OR Yak OR Yaks OR Holstein OR bovine OR beef OR calf OR calves OR steer* OR heifer* OR bull OR bulls OR ox OR oxen OR bullock* OR grazing OR foraging OR "feed crop*" OR "fodder crop*" OR ((pastur* OR herbage OR forage) AND allowance*) OR "sward height" OR "canopy height") AND TS=("methane	2736

	emission*" OR "methane production" OR "methane yield" OR "methane intensity" OR "CH4" OR "Ym") AND TS=(weight* OR weighing OR "daily gain" OR ("dry matter" OR herbage OR pasture OR forage OR feed) AND intake) OR "DMI" OR "ADG")	
CABI Digital Library	(cattle* OR Cow OR Cows OR "Bos indicus" OR Zebu* OR Taurus OR "Bos grunniens" OR Yak OR Yaks OR Holstein OR bovine OR beef OR calf OR calves OR steer* OR heifer* OR bull OR bulls OR ox OR oxen OR bullock* OR bovinos OR bovino OR boi OR bois OR vaca OR vacas OR gado OR ganado OR grazing OR foraging OR "feed crop" OR "fodder crop" OR "feed crops" OR "fodder crops" OR ((pastur* OR herbage OR forage) AND allowance*) OR "sward height" OR "canopy height" OR pastejo OR pastoreio OR pastoreo OR forragem OR Forraje) AND ("methane emission" OR "methane emissions" OR "methane production" OR "methane yield" OR "methane intensity" OR "CH4" OR "Ym" OR metano) AND (weight* OR weighing OR "daily gain" OR ("dry matter" OR herbage OR pasture OR forage OR feed) AND intake) OR "DMI" OR "ADG" OR "Peso Corporal")	2577
ProQuest Dissertations & Theses Citation Index	TS=(cattle* OR Cow OR Cows OR "Bos indicus" OR Zebu* OR Taurus OR "Bos grunniens" OR Yak OR Yaks OR Holstein OR bovine OR beef OR calf OR calves OR steer* OR heifer* OR bull OR bulls OR ox OR oxen OR bullock* OR grazing OR foraging OR "feed crop*" OR "fodder crop*" OR ((pastur* OR herbage OR forage) AND allowance*) OR "sward height" OR "canopy height") AND TS=("methane emission*" OR "methane production" OR "methane yield" OR "methane intensity" OR "CH4" OR "Ym") AND TS=(weight* OR weighing OR "daily gain" OR ("dry matter" OR herbage OR pasture OR forage OR feed) AND intake) OR "DMI" OR "ADG")	164
Google Scholar	("methane emission" OR "methane emissions" OR "methane production" OR "methane yield" OR "methane intensity" OR metano) AND (weight OR Weights OR weighing OR "daily gain" OR ("dry matter" OR herbage OR pasture OR forage OR feed) AND intake) OR "Peso Corporal") AND (cattle OR Cattles OR Zebus OR steers OR Cow OR Cows OR Zebu OR bovine OR beef OR calf OR calves OR steer OR bovinos OR bovino OR boi OR bois OR vaca OR vacas OR gado OR ganado OR grazing OR foraging OR "feed crop" OR "fodder crop" OR "feed crops" OR "fodder crops" OR (pasture OR pasturing OR herbage OR forage) AND allowance) OR "sward height" OR "canopy height" OR pastejo OR pastoreio OR pastoreo OR forragem OR Forraje)	100

As estratégias de busca foram realizadas para cada base de dados, utilizando combinações específicas de palavras e truncamentos, com o auxílio de uma bibliotecária.

ANEXO B: SCRIPT UTILIZADO NO PROGRAMA COMPUTACIONAL “R” PARA O ESTUDO DE METAREGRESSÃO

```

#
=====
=
# ===          DADOS METANALISE - ch4 gkgganho          =====
#
=====
=

rm(list=ls(all=TRUE)) #limpando a memoria

# =====
# Pacotes
# =====
library(dplyr)
require(openxlsx)
library(ggplot2)
library(tidyverse)
library(metafor)

# =====
# Importando e preparando dados
# =====

getwd() #retorna o diretorio atual
setwd("K:/Meu Drive/Meta_Analise_Henrique")
dir() #retorna os arquivos no diretorio

dados<-read.xlsx("Dados_gmd_CH4.xlsx", sheet = "Ch4_gkgganho")
head(dados) #retorna as 6 primeiras linhas dos dados
str(dados) #retorna a estrutura do banco de dados
names(dados)

#####
#####
#
#####
#####

#Calcular a variancia
# Variância do lnRR
dados$var_lnRR <- (dados$SD_texp^2 / (dados$n_texp * dados$mean_texp^2)) +
  (dados$SD_cont^2 / (dados$n_cont * dados$mean_cont^2))

##erro-padrão:
dados$se_lnRR <- sqrt(dados$var_lnRR)

dados$lnRR_GMD <- log(dados$GMD_texp / dados$GMD_cont)

# lnRR → efeito da intensidade
# var_lnRR → variância do lnRR
# lnRR_GMD → lnRR do ganho médio diário
# Ensaio → identificador do artigo

```

```

# Espécie → bovino / ovino
# Sistema → confinamento / pastejo

# Transformando em fatores
dados$Especie <- factor(dados$Especie) # espécie
dados$Sistema <- factor(dados$Sistema) # sistema
dados$Ensaio <- factor(dados$Ensaio)

attach(dados) #desvinculando variaveis
glimpse(dados) #estrutura dos dados

m0 <- rma.mv(
  yi = lnRR,
  V = var_lnRR,
  random = ~ 1 | Ensaio,
  method = "REML",
  data = dados
)
summary(m0)

sum(is.na(dados$Ensaio)) #NA na coluna
dados[is.na(dados$Ensaio), ] #linha do NA

##Resultados
#lnRR = -0.2903
#p = 0.252
#exp(-0.2903) - 1
# ≈ -25.2%
#Em média, redução de ~25% na intensidade de emissão,
#mas NÃO é estatisticamente significativa, esperado com esse nível de
heterogeneidade.

#Medidas da variancia
summary(dados$var_lnRR)
quantile(dados$var_lnRR, probs = c(0.01, 0.99))
boxplot(dados$var_lnRR)

#Identificar os estudos problematicos
dados[ dados$var_lnRR < 1e-4,
  c("Ensaio", "var_lnRR", "mean_texp", "mean_cont", "SD_texp", "SD_cont", "n_texp",
    "n_cont") ]

#Remover a linha
dados <- dados[-121, ]

m0 <- rma.mv(
  yi = lnRR,
  V = var_lnRR,
  random = ~ 1 | Ensaio,
  method = "REML",
  data = dados
)
summary(m0)

##Resultados
#lnRR = -0.281
#p = 0.275
#exp(-0.2811) - 1
# ≈ -24.5%

```

```
#Em média, redução de ~24.5% na intensidade de emissão,
#mas NÃO é estatisticamente significativa,
#####
#####
```

```
##Modelo GMD
#Meta-regressão com GMD:
```

```
m1 <- rma.mv(
  yi = lnRR,
  V = var_lnRR,
  mods = ~ lnRR_GMD,
  random = ~ 1 | Ensaio,
  method = "REML",
  data = dados
)
summary(m1)
```

```
#O moderador lnRR_GMD é fortíssimo
#lnRR_GMD = -0.4183
#p < 0.0001
#quanto maior o ganho médio diário relativo, menor a intensidade de emissão (g CH4/kg
GMD).
#Biologicamente: eficiência produtiva reduz emissão por unidade de ganho.
```

```
#Comparando os modelos:
anova(m0, m1)
```

```
#O moderador faz muita diferença
#LRT = 241.63
#p < 0.0001
#O modelo com lnRR_GMD é muito superior ao modelo sem moderadores.
```

```
##FIGURA DA META-REGRESSÃO
```

```
# dados para predição
newdat <- data.frame(
  lnRR_GMD = seq(
    from = min(dados$lnRR_GMD, na.rm = TRUE),
    to = max(dados$lnRR_GMD, na.rm = TRUE),
    length.out = 100
  )
)
```

```
# Predições do modelo
pred <- predict(m1, newmods = newdat$lnRR_GMD)
```

```
#Calcular pesos (para tamanho dos pontos)
pesos <- 1 / dados$var_lnRR
pesos <- pesos / max(pesos) # normaliza
```

```
#grafico
x11()
plot(
  dados$lnRR_GMD, dados$lnRR,
  pch = 21,
  bg = rgb(0, 0, 0, 0.4),
```

```

    cex = 0.6 + 2 * pesos,
    xlab = "lnRR do ganho médio diário (GMD)",
    ylab = "lnRR da intensidade de emissão (g CH4/kg GMD)",
    bty = "l"
  )

# Linha da meta-regressão
lines(newdat$lnRR_GMD, pred$pred, lwd = 2)

# Intervalo de confiança
lines(newdat$lnRR_GMD, pred$ci.lb, lty = 2)
lines(newdat$lnRR_GMD, pred$ci.ub, lty = 2)

# Linha horizontal em zero
abline(h = 0, lty = 3)

# grafico na escala percentual

dados$perc_lnRR <- (exp(dados$lnRR) - 1) * 100
dados$perc_lnRR_GMD <- (exp(dados$lnRR_GMD) - 1) * 100

newdat <- data.frame(
  lnRR_GMD = seq(
    min(dados$lnRR_GMD, na.rm = TRUE),
    max(dados$lnRR_GMD, na.rm = TRUE),
    length.out = 100
  )
)

pred <- predict(m1, newmods = newdat$lnRR_GMD)

pred$perc_pred <- (exp(pred$pred) - 1) * 100
pred$perc_lb <- (exp(pred$ci.lb) - 1) * 100
pred$perc_ub <- (exp(pred$ci.ub) - 1) * 100

newdat$perc_lnRR_GMD <- (exp(newdat$lnRR_GMD) - 1) * 100

pesos <- 1 / dados$var_lnRR
pesos <- pesos / max(pesos)

x11()
plot(
  dados$perc_lnRR_GMD, dados$perc_lnRR,
  pch = 21,
  bg = rgb(0, 0, 0, 0.4),
  cex = 0.6 + 2 * pesos,
  xlab = "Variação percentual no GMD (%)",
  ylab = expression("Variação percentual na intensidade de emissão de " * CH[4] * " (%)" ),
  bty = "l"
)

# Linha da meta-regressão
lines(newdat$perc_lnRR_GMD, pred$perc_pred, lwd = 2)

# Intervalo de confiança
lines(newdat$perc_lnRR_GMD, pred$perc_lb, lty = 2)
lines(newdat$perc_lnRR_GMD, pred$perc_ub, lty = 2)

```

```

# Linhas de referência
abline(h = 0, lty = 3)
abline(v = 0, lty = 3)

#### Grafico em valor absoluto de GMD

# GMD de referência (controle)
GMD_ref <- mean(dados$GMD_cont, na.rm = TRUE)

# Converter dados observados
dados$GMD_abs <- GMD_ref * exp(dados$lnRR_GMD)
dados$perc_lnRR <- (exp(dados$lnRR) - 1) * 100

# Converter previsões
newdat$GMD_abs <- GMD_ref * exp(newdat$lnRR_GMD)

pred$perc_pred <- (exp(pred$pred) - 1) * 100
pred$perc_lb <- (exp(pred$ci.lb) - 1) * 100
pred$perc_ub <- (exp(pred$ci.ub) - 1) * 100

# Pesos
pesos <- 1 / dados$var_lnRR
pesos <- pesos / max(pesos)

pred_plot <- data.frame(
  GMD_abs = newdat$GMD_abs,
  perc_pred = pred$perc_pred,
  perc_lb = pred$perc_lb,
  perc_ub = pred$perc_ub
)

library(ggplot2)

x11()
ggplot() +
  # Pontos observados (ponderados)
  geom_point(
    data = dados,
    aes(
      x = GMD_abs,
      y = perc_lnRR,
      size = sqrt(1 / var_lnRR)
    ),
    shape = 21,
    fill = "grey40",
    color = "black",
    alpha = 0.45
  ) +

  # Intervalo de confiança da meta-regressão
  geom_ribbon(
    data = pred_plot,
    aes(
      x = GMD_abs,
      ymin = perc_lb,

```

```

    ymax = perc_ub
  ),
  fill = "grey70",
  alpha = 0.5
) +

# Linha da meta-regressão
geom_line(
  data = pred_plot,
  aes(
    x = GMD_abs,
    y = perc_pred
  ),
  linewidth = 1.5,
  color = "black"
) +

# Linhas de referência
geom_hline(yintercept = 0, linetype = "dashed") +

scale_size_continuous(guide = "none") +

labs(
  x = expression("Ganho médio diário (kg animal"^-1)*" dia"^-1)*"),
  y = expression("Variação percentual na intensidade de emissão de " ~ ~ CH[4] ~ "
(%)")
) +
theme_classic(base_size = 14)

#####
#####

#Testar se o efeito do GMD depende de espécie:

levels(dados$Especie)

m_especie<- rma.mv(
  yi = lnRR,
  V = var_lnRR,
  mods = ~ lnRR_GMD * Especie,
  random = ~1 | Ensaio,
  data = dados)
summary(m_especie)

#Grafico
#Preparar dados em escala percentual
# Dados observados
dados$perc_lnRR <- (exp(dados$lnRR) - 1) * 100
dados$perc_lnRR_GMD <- (exp(dados$lnRR_GMD) - 1) * 100

# Pesos
pesos <- 1 / dados$var_lnRR
pesos <- pesos / max(pesos)

#Criar grid de predição por espécie
grid <- expand.grid(

```

```

lnRR_GMD = seq(
  min(dados$lnRR_GMD, na.rm = TRUE),
  max(dados$lnRR_GMD, na.rm = TRUE),
  length.out = 100
),
Especie = levels(dados$Especie)
)

pred <- predict(
  m_especie,
  newmods = model.matrix(~ lnRR_GMD * Especie, data = grid)[, -1]
)

# Converter para %
grid$perc_lnRR_GMD <- (exp(grid$lnRR_GMD) - 1) * 100
grid$perc_pred <- (exp(pred$pred) - 1) * 100
grid$perc_lb <- (exp(pred$ci.lb) - 1) * 100
grid$perc_ub <- (exp(pred$ci.ub) - 1) * 100

#Definir cores por espécie
cores <- c(
  "Bovinos" = "#1B9E77",
  "Ovinos" = "#D95F02"
)

x11()
plot(
  dados$perc_lnRR_GMD, dados$perc_lnRR,
  pch = 21,
  bg = adjustcolor(cores[dados$Especie], alpha.f = 0.5),
  col = cores[dados$Especie],
  cex = 0.6 + 2 * pesos,
  xlab = "Variação percentual no GMD (%)",
  ylab = expression("Variação percentual na intensidade de emissão de de " ~ ~ CH[4] ~
" (%)"),
  bty = "l"
)

# Linhas por espécie
for(sp in levels(dados$Especie)) {
  idx <- grid$Especie == sp

  lines(
    grid$perc_lnRR_GMD[idx],
    grid$perc_pred[idx],
    col = cores[sp],
    lwd = 2
  )

  lines(
    grid$perc_lnRR_GMD[idx],
    grid$perc_lb[idx],
    col = cores[sp],
    lty = 2
  )

  lines(
    grid$perc_lnRR_GMD[idx],

```

```

        grid$perc_ub[idx],
        col = cores[sp],
        lty = 2
    )
}

# Linhas de referência
abline(h = 0, lty = 3)
abline(v = 0, lty = 3)

# Legenda
legend(
  "topright",
  legend = levels(dados$Especie),
  col = cores,
  lwd = 2,
  bty = "n"
)
#####
#####

#Efeito do GMD por sistema

levels(dados$Sistema)

#Limpar o texto
dados$Sistema <- trimws(dados$Sistema)

#Reciar o fator
dados$Sistema <- factor(dados$Sistema)
levels(dados$Sistema)

#Pastejo como referência:
dados$Sistema <- relevel(dados$Sistema, ref = "Pastejo")

m_sistema <- rma.mv(
  yi = lnRR,
  V = var_lnRR,
  mods = ~ lnRR_GMD * Sistema,
  random = ~1 | Ensaio,
  data = dados
)
summary(m_sistema)

#grafico

x_seq <- seq(
  min(dados$lnRR_GMD, na.rm = TRUE),
  max(dados$lnRR_GMD, na.rm = TRUE),
  length.out = 100
)

newdat <- expand.grid(
  lnRR_GMD = x_seq,
  Sistema = c("Pastejo", "Confinamento")
)

```

```

X <- model.matrix(~ lnRR_GMD * Sistema, newdat)[-1]

pred <- predict(
  m_sistema,
  newmods = X
)

pred_df <- cbind(newdat, pred)

pred_df$perc_GMD <- (exp(pred_df$lnRR_GMD) - 1) * 100
pred_df$perc_lnRR <- (exp(pred_df$pred) - 1) * 100
pred_df$perc_lb <- (exp(pred_df$ci.lb) - 1) * 100
pred_df$perc_ub <- (exp(pred_df$ci.ub) - 1) * 100

dados$perc_lnRR_GMD <- (exp(dados$lnRR_GMD) - 1) * 100
dados$perc_lnRR <- (exp(dados$lnRR) - 1) * 100

library(ggplot2)

library(ggplot2)

x11()
ggplot(dados, aes(x = perc_lnRR_GMD, y = perc_lnRR)) +

  # Pontos (mesma cor do sistema)
  geom_point(
    aes(fill = Sistema),
    shape = 21,
    color = "black",
    alpha = 0.4,
    size = 2,
    show.legend = TRUE
  ) +

  # Linha principal da meta-regressão
  geom_line(
    data = pred_df,
    aes(x = perc_GMD, y = perc_lnRR, color = Sistema),
    linewidth = 1.2,
    inherit.aes = FALSE
  ) +

  # Intervalo de confiança (pontilhado)
  geom_line(
    data = pred_df,
    aes(x = perc_GMD, y = perc_lb, color = Sistema),
    linetype = "dotted",
    linewidth = 0.9,
    inherit.aes = FALSE
  ) +
  geom_line(
    data = pred_df,
    aes(x = perc_GMD, y = perc_ub, color = Sistema),
    linetype = "dotted",
    linewidth = 0.9,
    inherit.aes = FALSE
  )

```

```

) +

# Linhas de referência
geom_hline(yintercept = 0, linetype = "dashed") +
geom_vline(xintercept = 0, linetype = "dashed") +

# Rótulos
labs(
  x = "Variação percentual no ganho médio diário (%)",
  y = expression("Variação percentual na intensidade de emissão de CH"[4]*" (%)"),
  color = "Sistema produtivo",
  fill = "Sistema produtivo"
) +

# Tema limpo (sem grid)
theme_classic(base_size = 12) +

# Legenda dentro do gráfico
theme(
  legend.position = c(0.82, 0.85),
  legend.background = element_rect(
    fill = "white",
    colour = "grey70"
  ),
  legend.key = element_blank()
)

##Especie e sistema produtivo:
m_completo<-rma.mv(
  yi = lnRR,
  V = var_lnRR,
  mods = ~ lnRR_GMD * Especie * Sistema,
  random = ~1 | Ensaio,
  data = dados
)
summary(m_completo)

#####
#####

#Modelo final parcimonioso

m_final <- rma.mv(
  yi = lnRR,
  V = var_lnRR,
  mods = ~ lnRR_GMD * Sistema + Especie,
  random = ~ 1 | Ensaio,
  method = "REML",
  data = dados
)
summary(m_final)

#grafico

```

```

library(ggplot2)

# Sequência do moderador (lnRR_GMD)
x_seq <- seq(
  min(dados$lnRR_GMD, na.rm = TRUE),
  max(dados$lnRR_GMD, na.rm = TRUE),
  length.out = 100
)

# Coeficientes do modelo final
b0 <- -0.3822
b1 <- -0.5953
b2 <- 0.0133 # SistemaConfinamento
b3 <- 0.4456 # interação

# Predições em lnRR
pred_df <- data.frame(
  lnRR_GMD = rep(x_seq, 2),
  Sistema = rep(c("Pastejo", "Confinamento"), each = length(x_seq))
)

pred_df$lnRR_pred <- with(pred_df,
  ifelse(
    Sistema == "Pastejo",
    b0 + b1 * lnRR_GMD,
    (b0 + b2) + (b1 + b3) * lnRR_GMD
  )
)

# Converter para %
pred_df$perc_GMD <- (exp(pred_df$lnRR_GMD) - 1) * 100
pred_df$perc_lnRR <- (exp(pred_df$lnRR_pred) - 1) * 100

dados$perc_lnRR_GMD <- (exp(dados$lnRR_GMD) - 1) * 100
dados$perc_lnRR <- (exp(dados$lnRR) - 1) * 100

dados$peso <- 1 / dados$var_lnRR

x11()
ggplot(dados, aes(x = perc_lnRR_GMD, y = perc_lnRR)) +
  geom_point(
    aes(
      color = Sistema,
      shape = Especie,
      size = sqrt(1 / var_lnRR)
    ),
    alpha = 0.4
  ) +
  geom_line(
    data = pred_df,
    aes(
      x = perc_GMD,
      y = perc_lnRR,
      color = Sistema
    ),
    linewidth = 1.2,
    inherit.aes = FALSE
  )

```

```

) +
geom_hline(yintercept = 0, linetype = "dashed") +
geom_vline(xintercept = 0, linetype = "dashed") +
scale_size_continuous(guide = "none") +
scale_color_manual(
  values = c(
    "Pastejo" = "#009E73",
    "Confinamento" = "#D55E00"
  )
) +
scale_shape_manual(
  values = c(
    "Bovinos" = 16, # círculo
    "Ovinos" = 17 # triângulo
  )
) +
labs(
  x = "Variação percentual no ganho médio diário (%)",
  y = expression("Variação percentual na intensidade de emissão de CH"[4]" (%)"),
  color = "Sistema produtivo",
  shape = "Espécie"
) + theme_classic(base_size = 12) +
theme(
  legend.position = c(0.85, 0.78),
  legend.background = element_rect(
    fill = "white",
    colour = "grey70"
  ),
  legend.key = element_blank()
)

```



Assinaturas do documento



Código para verificação: **68H57XLW**

Este documento foi assinado digitalmente pelos seguintes signatários nas datas indicadas:



HENRIQUE MENDONCA NUNES RIBEIRO FILHO (CPF: 504.XXX.900-XX) em 16/03/2026 às 11:00:10

Emitido por: "SGP-e", emitido em 30/03/2018 - 12:42:16 e válido até 30/03/2118 - 12:42:16.

(Assinatura do sistema)

Para verificar a autenticidade desta cópia, acesse o link <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo/conferencia-documento/VURFU0NfMTlwMjJfMDAwMDYzNjVfNjM2N18yMDI2XzY4SDU3WExX> ou o site

<https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo> e informe o processo **UDESC 00006365/2026** e o código **68H57XLW** ou aponte a câmera para o QR Code presente nesta página para realizar a conferência.