

***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Gado de Leite
Ministério da Agricultura e Pecuária***

ISSN 1516-7453 / e-ISSN 2966-0866

Documentos 292

Março, 2025

Avanços conceituais em predição de gases de efeito estufa emitidos por bovinos no Brasil

Contribuições para inventários nacionais e desenvolvimento de estratégias de mitigação

*Ellen de Almeida Moreira
Luiz Gustavo Ribeiro Pereira
Vanessa Romário de Paula
Mariana Magalhães Campos
Fernanda Samarini Machado
João Paulo Sacramento
João Paulo Pacheco Rodrigues
Alexandre Lima Ferreira
Thierry Ribeiro Tomich*

***Embrapa Gado de Leite
Juiz de Fora, MG
2025***

Embrapa Gado de Leite

Rua Eugênio do Nascimento, 610 - Bairro Dom Bosco
36038-330 Juiz de Fora, MG
Fone: (32) 3311-7405
<https://www.embrapa.br/gado-de-leite>
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações**Presidente**

Jorge Fernando Pereira

Secretário-executivo

Carlos Renato Tavares de Castro

Membros

Cláudio Antônio Versiani Paiva

Deise Ferreira Xavier

Edna Froeder Arcuri

Fausto de Souza Sobrinho

Fernando César Ferraz Lopes

Francisco José da Silva Ledo

Frank Ângelo Tomita Bruneli

Heloisa Carneiro

Jackson Silva e Oliveira

Juarez Campolina Machado

Leovegildo Lopes de Matos

Luiz Ricardo da Costa

Márcia Cristina de Azevedo Prata

Marta Fonseca Martins

Pérsio Sandir D'Oliveira

Rui da Silva Verneque

Virgínia de Souza Columbiano

William Fernandes Bernardo

Edição executiva

Ellen de Almeida Moreira

Normalização bibliográfica

Rosângela Lacerda de Castro

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Luiz Ricardo da Costa

Foto da capa

Ellen de Almeida Moreira

1ª edição

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Gado de Leite

Avanços conceituais em predição de gases de efeito estufa emitidos por bovinos no Brasil : contribuições para inventários nacionais e desenvolvimento de estratégias de mitigação / Ellen de Almeida Moreira ... [et al.]... – Juiz de Fora : Embrapa Gado de Leite, 2025.

PDF (11 p.) : il. -- (Documentos / Embrapa Gado de Leite, e-ISSN 2966-0866 ; 292).

1. Bovino. 2. Metano entérico. 3. Mitigação. I. Moreira, Ellen de Almeida. II. Pereira, Luiz Gustavo Ribeiro. III. Paula, Vanessa Romário de. IV. Campos, Mariana Magalhães. V. Machado, Fernanda Samarini. VI. Sacramento, João Paulo. VII. Rodrigues, João Paulo Pacheco. VIII. Ferreira, Alexandre Lima. IX. Tomich, Thierry Ribeiro. X. Série.

CDD (21. ed.) 636.244

Rosângela Lacerda de Castro (CRB-6/2749)

© 2025 Embrapa

Autores

Ellen de Almeida Moreira

Biomédica, doutora em Ciência Animal, bolsista da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG

Luiz Gustavo Ribeiro Pereira

Médico veterinário, doutor em Ciência Animal, pesquisador da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG

Vanessa Romário de Paula

Administradora, mestre em Ambiente Construído, analista da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG

Mariana Magalhães Campos

Médica veterinária, doutora em Zootecnia, pesquisadora da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG

Fernanda Samarini Machado

Médica veterinária, doutora em Zootecnia, pesquisadora da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG

João Paulo Sacramento

Zootecnista, doutor em Bioengenharia de Sistemas Ecológicos, pós-doutorando na Michigan State University, Michigan, USA

João Paulo Pacheco Rodrigues

Zootecnista, doutor em Zootecnia, docente na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ

Alexandre Lima Ferreira

Médico veterinário, doutor em Ciência Animal, Auditor Fiscal Federal Agropecuário, Maringá, PR

Thierry Ribeiro Tomich

Médico veterinário, doutor em Ciência Animal, pesquisador da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG

Sumário

Introdução	4
Equações de predição de metano entérico para bovinos de leite	5
Equações de predição de metano entérico para bovinos de corte	6
Estratégias de mitigação de metano entérico	7
Aplicando os modelos desenvolvidos	9
Considerações finais	10
Referências	10

Introdução

As mudanças climáticas de origem antropogênica têm desafiado a humanidade, e questões relacionadas à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) estão cada vez mais presentes no dia a dia. O consumo de energia fóssil é a principal fonte de GEE, representando 75,6% das emissões globais. Outros emissores importantes incluem a agricultura (11,6%), processos industriais (6,1%), resíduos (3,3%) e uso da terra e silvicultura (3,3%). Sessenta por cento das emissões globais de metano (CH_4) são de atividades humanas, com 32% dessas emissões vindas da fermentação entérica e do manejo de dejetos. Os países em desenvolvimento são responsáveis por aproximadamente 70% das emissões de CH_4 geradas pela pecuária em nível global, sendo que 25% dessas emissões têm origem na América Latina e no Caribe (Ge et al., 2020; Congio et al., 2022).

Desde meados da década de 1990, a Embrapa realiza pesquisas sobre GEE em sistemas agropecuários. Inicialmente, criou a Rede Agrogases, que conduziu o projeto "Dinâmica de carbono e gases de efeito estufa em sistemas de produção agropecuária, florestal e agroflorestal brasileiros", gerando dados fundamentais sobre GEE no setor agrícola. Outras redes sucederam a Agrogases, incluindo a Rede Pecus, focada na dinâmica de GEE e balanço de carbono em sistemas agropecuários nos seis biomas brasileiros; a Rede Saltus, que estudou GEE e estoques de carbono em florestas; e a Rede Fluxus, dedicada à dinâmica de GEE e balanço de carbono em sistemas de produção de grãos.

Destacando as pesquisas acerca de GEE na pecuária, desde 2010, Redes de Pesquisa como o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Ciência Animal (INCT-CA), PECUS e RumenGases, têm permitido a investigação das emissões de GEE provenientes da pecuária brasileira. Isto impulsionou avanços conceituais em diagnósticos e estratégias de mitigação de metano entérico em ruminantes no Brasil, especialmente a partir da implantação da estrutura laboratorial de referência para avaliação de CH_4 entérico no Laboratório Multiusuário de Bioeficiência e Sustentabilidade da Pecuária, situado no Campo Experimental José Henrique Bruschi, propriedade da Embrapa Gado de Leite, em Coronel Pacheco, MG (Embrapa, 2024).

Por meio da utilização das principais metodologias disponíveis, incluindo câmara respirométrica, considerada padrão ouro, o método do gás traçador hexafluoreto de enxofre (SF_6), técnicas *in vitro* e coletas spot por máscara facial, foram obtidos dados relevantes ao longo dos anos de 2012 a 2020. Esse esforço conjunto permitiu a padronização das metodologias e a criação de um banco de dados nacional sobre emissões de metano entérico das principais espécies ruminantes de interesse zootécnico, além do desenvolvimento de modelos de predição de GEE específicos para as condições brasileiras.

Os resultados obtidos foram essenciais para o aprimoramento do inventário nacional de GEE, fornecendo informações detalhadas sobre as emissões de metano entérico e outras fontes associadas à pecuária. Além disso, esses dados têm sido fundamentais para estabelecer estratégias de mitigação que visam tornar a pecuária brasileira mais sustentável e eficiente em termos de emissões de GEE.

Assim, este documento tem por objetivo resumir os principais resultados obtidos em pesquisas realizadas pela Embrapa e instituições parceiras sobre gases de efeito estufa em sistemas de produção de bovinos de leite e carne instalados no Brasil, e apresentar modelos de predição e estratégias de mitigação de emissão de metano entérico desenvolvidos pela rede de pesquisa INCT-CA, Pecus e RumenGases.

As informações contidas nesse documento contribuem para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) de números 1 (Erradicação da pobreza: Acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares), 2 (Erradicação da fome: Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável) e 13 (Combate às Mudanças Climáticas: Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos*), uma vez apresenta estratégias para reduzir as emissões de gases de efeito estufa no setor pecuário, promovendo a segurança alimentar e o desenvolvimento econômico sem afetar a produtividade. Além disso, a colaboração em rede entre instituições acadêmicas e de pesquisa, destacada no documento, é crucial para desenvolver soluções inovadoras para os desafios da pecuária e do meio ambiente no Brasil.

Equações de predição de metano entérico para bovinos de leite

A estimativa precisa das emissões de CH₄ entérico de ruminantes é crucial para os inventários nacionais de GEE e para avaliar estratégias dietéticas de mitigação. Os inventários nacionais de emissões de CH₄ entérico são atualmente estimados utilizando as metodologias do Intergovernmental Panel on Climate Change (2006), principalmente a Tier 2, que exige dados mais detalhados do país, como a ingestão de energia bruta e fatores de conversão de metano para categorias específicas do rebanho. A determinação das emissões de CH₄ de animais individuais exige equipamentos especializados e metodologias caras (Benaouda et al., 2019). Modelos de predição que consideram o consumo de matéria seca (CMS) são frequentemente utilizados e podem ser combinados com fatores de emissão para calcular as emissões de CH₄, seguindo a abordagem Tier 2 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006), a qual é baseada em dados específicos de cada país. No entanto, a precisão dessas predições depende de amostras grandes e representativas, ressaltando a importância de um banco de dados robusto (Hristov et al., 2018).

Baseado em dados coletados a partir de estudos nacionais sobre emissões de metano entérico, realizados pelo projeto RumenGases, Ribeiro et al. (2020) avaliaram 54 equações de predição disponíveis na literatura, e desenvolveram 96 modelos lineares múltiplos para prever a produção de CH₄ (MJ/dia). Os dados sobre ingestão de nutrientes, composição da dieta e emissões de CH₄ foram compilados a partir de estudos *in vivo* que utilizaram câmaras respiratórias de circuito aberto, a técnica do SF₆ ou o sistema GreenFeed®.

As variáveis preditoras incluíram CMS, ingestão de energia bruta (IEB), peso vivo (PV), CMS como proporção do PV, concentração de FDN, concentração de extrato etéreo (EE), proporção dietética de concentrado e digestibilidade da energia bruta. Os modelos foram selecionados com base em critérios de significância estatística e multicolinearidade.

Os modelos desenvolvidos no estudo de Ribeiro et al. (2020) apresentaram desempenho superior, especialmente para bovinos em crescimento e vacas

não lactantes, incluindo equações mais complexas, permitindo correções para características da dieta. Para vacas em lactação, as equações foram baseadas principalmente em características da ingestão e do animal. Neste estudo foi observado que o método do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006) Tier 2 teve melhor desempenho para todas as categorias de animais, exceto para vacas em lactação, para as quais houve superestimação da produção de CH₄.

Em um passo seguinte, o banco de dados do projeto RumenGases foi utilizado em conjunto com um banco de dados de países da América Latina, Central e Caribe, dando origem aos modelos de predição para condições tropicais (Congio et al., 2022). O trabalho compilou dados de 34 estudos, totalizando 610 registros individuais de bovinos leiteiros.

Os dados utilizados neste estudo fazem parte do 'Latin America Methane Project' (LAMP), que é uma iniciativa de pesquisa que envolve cientistas de países da América Latina, Central e Caribe que estudam a emissão de CH₄ *in vivo* em ruminantes, no qual o projeto RumenGases e a rede INCT-CA fazem parte, fornecendo dados coletados a partir de estudos nacionais sobre emissões de metano entérico.

Neste estudo foi observado que o CMS foi o preditor mais importante para a produção de CH₄. Os melhores modelos de produção de CH₄ superaram as equações de Tier 2 do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006) nos subconjuntos de dados gerais e de pastoreio, e apresentaram desempenho semelhante para animais confinados. Modelos que incluem a produção de leite podem ser precisos quando o CMS não está disponível. Algumas equações pré-existent na literatura apresentaram desempenho semelhante aos melhores modelos desenvolvidos e podem prever a produção de CH₄ em vacas leiteiras criadas na região da América Latina, Central e Caribe. O uso dos novos modelos, em detrimento das equações baseadas em fatores de conversão de energia do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006), tem melhorado a precisão dos inventários de GEE na região da América Latina, Central e Caribe.

A Tabela 1 apresenta uma síntese das equações de regressão/predição que apresentaram o melhor desempenho preditivo para a emissão de metano entérico, desenvolvidas por Ribeiro et al. (2020) e Congio et al. (2022)

Tabela 1. Equações de regressão/predição para a emissão de metano entérico, desenvolvidas por Ribeiro et al. (2020) e Congio et al. (2022).

Referência	Equação	Equação ¹
GEN ² Ribeiro et al. (2020)	1	0,734 (1,005) + 0,041 (0,005) x GEI + 0,009 (0,002) x BW - 0,040 (0,011) x EE 2,048
	2	(0,436) + 0,052 (0,002) x GEI - 0,038 (0,01) x EE
	3	1,067 (0,332) + 0,051 (0,003) x GEI
	4	0,494 (0,694) + 0,775 (0,072) x DMI + 0,008 (0,002) x BW - 0,037 (0,011) x EE 1,947
	5	(0,469) + 0,934 (0,052) x DMI - 0,032 (0,011) x EE -0,3 (0,6) + 0,753 (0,068) x DMI + 0,007 (0,002) x BW 1,101 (0,275) + 0,906 (0,046) x DMI
LAC ² Ribeiro et al. (2020)	1	4,15 (1,53) + 0,822 (0,136) x DMI
	2	3,35 (1,52) + 0,047 (0,007) x GEI
GCNL ² Ribeiro et al. (2020)	1	1,597 (0,603) + 0,0563 (0,005) x GEI - 0,04 (0,013) x EE 0,983 (0,572) + 0,0368 (0,0038) x GEI + 0,0098 (0,0019) x BW 1,002 (0,335) + 0,0497 (0,0036) x GEI
	2	0,97 (0,76) + 0,813 (0,104) x DMI + 0,0054 (0,0025) x BW - 0,0403 (0,0103) x EE
	3	1,943 (0,631) + 0,943 (0,09) x DMI - 0,037 (0,01) x EE 1,006 (0,577) + 0,9072 (0,091) x DMI
Todos os dados Congio et al. (2022)	1	40,7 (11,8) + 18,0 (0,592) x DMI 42,1 (11,7) + 1,00 (0,033) x GEI
	2	178 (136) + 7,21 (0,547) x MY 53 (14,5) + 8,26 (0,547) x EPCM 30,6 (14,1) + 16,3 (0,838) x DMI + 2,04 (0,522) x EPCM
Confinado Congio et al. (2022)	1	4,28 (12,8) + 19,8 (0,686) x DMI 7,91 (12,1) + 1,09 (0,037) x GEI
	2	157 (20,3) + 8,49 (0,745) x MY 130 (19,5) + 9,67 (0,682) x EPCM -642 (235) + 20,4 (0,741) x DMI + 34,9 (13,4) x GE + 5,92 (4,64) x EE - 4,06 (4,18) x MF + 3,53 (8,90)
Pastagem Congio et al. (2022)	1	89,3 (20,4) + 15,7 (1,00) x DMI 87,9 (20,9) + 5,70 (0,789) x GEI
	2	203 (17,4) + 5,70 (0,789) x MY 185 (20,4) + 6,39 (0,855) x EPCM -66,7 (446) + 14,2 (1,18) x DMI + 1,65 (25,5) x GE - 1,59 (17,6) x EE + 4,18 (4,26) x ash + 3,06 (0,808) x EPCM + 16,0 (10,6) x MP
Painel intergovernamental de mudanças climáticas (IPCC) (2006)	1	0,065 x GEI

¹DMI = dry matter intake (consumo de matéria seca, kg/dia); GEI = gross energy intake (ingestão de energia bruta, MJ/dia); MY = milk yield (produção de leite, kg/dia); EPCM = energy and protein-corrected milk (leite corrigido para gordura e proteína, kg/dia); GE = dietary gross energy (energia bruta da dieta, MJ kg MS); EE = dietary ether extract (teor de extrato etéreo na dieta, % MS); MF = milk fat (gordura do leite, %); MP = milk protein (proteína do leite, %); ash = dietary ash (teor de cinzas na dieta, % MS).

²GEN = todos os animais, LAC = vacas leiteiras em lactação e GCNL = bovinos em crescimento e vacas leiteiras não lactantes.

A aplicação dessas equações de regressão para predição da emissão de metano entérico resultou em estimativas mais precisas das emissões. Isso, por sua vez, contribui significativamente para melhorar a acurácia dos inventários de GEE em ambientes tropicais, e fornece uma melhor compreensão das características dietéticas e dos animais que influenciam a produção de CH₄ entérico em sistemas de produção tropical.

Equações de predição de metano entérico para bovinos de corte

Com relação aos dados de emissão de CH₄ entérico por bovinos de corte, a compilação do

banco de dados gerado nos projetos da rede RumenGases e do INCT-CA, foi utilizada para desenvolver os modelos de predição apresentados no trabalho de Congio et al. (2023). Os dados utilizados neste estudo fazem parte do LAMP, que é uma iniciativa de pesquisa que envolve cientistas de países da América Latina, Central e Caribe, que estudam a emissão de CH₄ in vivo em ruminantes, do qual o projeto RumenGases faz parte, fornecendo dados coletados a partir de estudos nacionais sobre emissões de metano entérico. Nesse estudo foi observado que a ingestão de alimentos e o ganho de peso médio diário foram os principais preditores da emissão de CH₄ (g/dia), enquanto o nível de alimentação (CMS como % do peso corporal) foi o preditor para o rendimento de CH₄ (g/kg de CMS). Os modelos preditos foram mais precisos do que as equações de IPCC Tier 2 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006) para todos os subconjuntos. Modelos de regressão

simples e múltipla, incluindo ganho médio diário, foram precisos e, por isso, foram considerados opção viável para prever a emissão de CH₄ quando dados sobre CMS não estiverem disponíveis.

Na Tabela 2 são apresentadas as equações

de predição de emissão de CH₄ (g/dia) para os subconjuntos de toda forragem (conteúdo forrageiro da dieta - DFC = 100%); alto teor de forragem (94% ≥ DFC ≥ 54%); e baixo teor de forragem (50% ≥ DFC).

Tabela 2. Equações de predição de emissão de CH₄ (g/dia) para os subconjuntos de toda forragem (conteúdo forrageiro da dieta - DFC = 100%); alto teor de forragem (94% ≥ DFC ≥ 54%); e baixo teor de forragem (50% ≥ DFC).

Referência	Equação	Equação ¹
Completa Congio et al. (2023)	1	114 (7,02) + 33,0 (4,17) x ADG
Total forragem Congio et al. (2023)	1	20,0 (12,3) + 19,6 (1,32) x DMI 65,2 (23,7) + 19,2 (1,38) x DMI - 21,2 (8,37) x EE 19,6 (12,3) + 1,15 (0,077) x GEI
	2	65,2 (23,6) + 1,12 (0,080) x GEI - 21,2 (8,36) x EE -89,9 (30,7) + 0,675 (0,093) x GEI + 0,358 (0,036) x BW + 6,53 (2,29) x ash -71,0 (20,9) + 0,570 (0,033) x BW + 27,9 (4,26) x FL
Alto teor de forragem Congio et al. (2023)	1	80,8 (9,81) + 63,6 (4,66) x ADG
Baixo teor de forragem Congio et al. (2023)	1	85,1 (28,3) + 0,655 (0,070) x GEI - 1,73 (1,76) x CP 207 (33,8) + 28,7 (5,59) x ADG - 6,21 (2,27) x CP
	2	10,3 (68,8) + 0,739 (0,084) x GEI - 17,4 (5,99) x FL + 11,3 (3,73) x GE - 7,18 (1,97) x CP - 9,37 (2,33) x EE
Painel intergovernamental de mudanças climáticas (IPCC) (2006)	1	0,065 x GEI

¹ADG = average daily gain (ganho médio diário, kg/dia); DMI = dry matter intake (consumo de matéria seca, kg/dia); EE = dietary ether extract content (teor de extrato etéreo na dieta, % MS); GEI = gross energy intake (ingestão de energia bruta, MJ/dia); BW = body weight (peso corporal, kg); ash = dietary ash content (teor de cinzas na dieta, % MS); FL = feeding level (nível de alimentação, CMS em % PV); CP = dietary crude protein content (teor de proteína bruta da dieta, % MS); GE = dietary gross energy (energia bruta da dieta, MJ kg MS).

Estratégias de mitigação de metano entérico

O setor pecuário, apesar de sua importância econômica, é uma fonte significativa de emissões de GEE, especialmente de CH₄ entérico e, por isso, pode ser considerado um contribuidor potencial para o aquecimento global em curto prazo. Reduzir essas emissões é essencial para cumprir as metas do Intergovernmental Panel on Climate Change (2018) sem, contudo, deixarem de ser considerados os “Objetivos de Desenvolvimento Sustentável” da ONU até 2030 (United Nations General Assembly, 2015), especialmente o combate à pobreza e à fome. No entanto, equilibrar o desenvolvimento econômico com a redução das emissões antropogênicas na agropecuária é um desafio que os governos de economias emergentes e em desenvolvimento enfrentam. Portanto, é importante identificar estratégias de mitigação de CH₄ que não prejudiquem o desempenho animal e ainda

auumentem a produtividade de sistemas de produção agropecuários.

Congio et al. (2021) compilaram um banco de dados de registros individuais de ovinos, bovinos de corte e bovinos leiteiros a partir de estudos sobre emissões de metano entérico na região da América Latina, Central e Caribe, e realizaram uma metanálise para identificar estratégias viáveis de mitigação do CH₄ entérico que não prejudicassem o desempenho animal. Após a remoção de outliers, foram mantidos na base de dados 2.745 registros de animais (representando 65% dos dados originais) de 103 estudos realizados na região da América Latina, Central e Caribe, entre 2011 e 2021. As estratégias potenciais de mitigação foram organizadas em três categorias principais (criação de animais, dieta e manipulação ruminal), com até três subcategorias, totalizando 34 estratégias avaliadas.

Das 34 estratégias de mitigação avaliadas naquele estudo, 16 reduziram a emissão de CH₄ entérico sem prejudicar a produtividade animal. Dessas, apenas seis reduziram simultaneamente as

emissões de CH₄, em média em 27%, e aumentaram a produtividade animal, em média em 68%, a saber: a composição genética F1 Holandês × Gir reduziu as emissões de metano em 38% e aumentou a produtividade animal em 99%. As estratégias de manejo adequado do pasto, seja sob lotação contínua ou rotativa, resultaram reduções de 22% e 35% nas emissões de CH₄ por ganho de peso médio diário, enquanto aumentaram o ganho médio diário em 22% e 71%, respectivamente. Aumentar a concentração de proteína na dieta e o nível de concentrado, reduziu as emissões de CH₄ por litro de leite e por ganho médio diário em 10% e 20%, respectivamente, ao mesmo tempo que aumentou a produção de leite e o ganho médio diário em 12% e 31%. Finalmente, aumentar a qualidade nutricional da dieta resultou em redução de 37% nas emissões de CH₄ por ganho médio diário, ao mesmo tempo em que aumentou o ganho médio diário em 171%.

A seleção genética mostrou-se eficaz na redução das emissões de metano entérico, mantendo ou aumentando o desempenho animal. Algumas composições raciais resultaram em aumento na produção de metano, devido à maior ingestão de matéria seca. A composição genética F1 Holandês × Gir apresentou aumento na produção de leite com redução nas emissões de metano por produção de leite, o que não ocorreu com a raça Holandesa pura. Esses resultados sugerem que dietas com menor teor energético pode limitar o potencial das vacas da raça Holandês, favorecendo cruzamentos adaptados localmente (Congio et al., 2021).

Os sistemas de pastoreio variam conforme o clima, as espécies vegetais e o gado, e incluem diferentes práticas como o pastejo contínuo e o rotativo. Essas práticas visam equilibrar as necessidades nutricionais dos animais com a disponibilidade e qualidade da forragem, promovendo a resiliência da pastagem a longo prazo. Estratégias como o manejo de pastejo têm mostrado potencial para aumentar a produção animal por hectare, reduzir as emissões de metano e aumentar os estoques de carbono no solo (Congio et al., 2021; Beauchemin et al., 2022). O manejo de pastagens, seja contínuo ou rotativo, reduz emissões de metano, aumentando o ganho médio diário e a produção de leite. Ambas as estratégias, preferencialmente com intensidades de pastejo moderadas/baixas, otimizam a produtividade animal e vegetal, reduzindo as emissões de GEE. O manejo baseado em alturas ideais de pré-pastejo também beneficia a redução das emissões de óxido nítrico (N₂O), reforçando o potencial do manejo do pastejo na sustentabilidade ambiental na pecuária (Congio et al., 2021).

A maior quantidade de proteína bruta (PB) dietética foi alcançada com a inclusão de fontes de proteína na fração de concentrado, o que levou a um aumento na produção de leite e a uma diminuição na intensidade de emissão de CH₄ por unidade de leite (CH₄/L de leite). Quando o conteúdo de PB dietética é baixo, como em dietas de forragem de baixa qualidade, comuns na região da América Latina, Central e Caribe, aumentar a proteína dietética pode melhorar o desempenho animal e reduzir a intensidade das emissões de CH₄. Contudo, níveis elevados de PB podem aumentar a excreção de N e as emissões de N₂O. Portanto, práticas de alimentação de precisão são necessárias para atender às necessidades nutricionais e evitar perdas desnecessárias de N para o ambiente (Congio et al., 2021).

O aumento dos níveis de concentrado na dieta diminui o tempo de retenção da digesta no rúmen e a fermentação ruminal, reduzindo a produção de CH₄ por unidade de alimento, embora as emissões totais de CH₄ aumentem. Em suma, dietas com mais concentrado aumentam a densidade energética, aceleram a passagem ruminal da digesta, e reduzem o pH e a produção de CH₄ por unidade de matéria seca consumida. Grãos processados promovem a fermentação rápida, elevam a produção de propionato e reduzem a metanogênese, além de inibir protozoários e diminuir a oferta de H₂ para metanogênese (Congio et al., 2021; Beauchemin et al., 2022).

As plantas podem ter compostos secundários que afetam o microbioma do rúmen e a emissão de CH₄. Taninos são estudados por seu efeito na mitigação de CH₄, com taninos hidrolisáveis inibindo *Archaea* metanogênicas e taninos condensados inibindo bactérias fibrolíticas, prejudicando a digestão de fibras. *Leucaena* spp., uma leguminosa nativa da região da América Latina, Central e Caribe, é promissora por suas propriedades antimetanogênicas, devido aos taninos condensados e à mimosina. A inclusão de *Leucaena* em dietas à base de gramíneas reduz a produção de CH₄ e aumenta o CMS, melhorando a retenção de nitrogênio e reduzindo a volatilização da amônia e as emissões de N₂O (Congio et al., 2021).

Na Tabela 3, são apresentadas estratégias de mitigação bem-sucedidas e seu efeito médio (%) nas métricas de emissões de CH₄ entérico. Já na Tabela 4, são resumidas as estratégias de mitigação bem-sucedidas e seu efeito médio (%) nas métricas de desempenho animal.

Tabela 3. Estratégias de mitigação bem-sucedidas e seu efeito médio (%) nas métricas de emissões de CH₄ entérico.

Estratégia		Potencial de redução de CH ₄			
		g/dia	g/kg de CMS	g/kg de leite	g/kg de carne
Criação de animais	Composição de raça (ex. F1 Holandês x Gir)	33,85%	Sem efeito	-37,6%	Sem efeito
	Manejo adequado da lotação em pastejo rotacionado	Sem efeito	-16,5%	-16,8%	-34,8%
Manipulação da dieta	Aumento da proteína na dieta	Sem efeito	Sem efeito	-9,7%	Sem efeito
	Aumento do nível de concentrado (caroço de algodão)	Sem efeito	-17,45%	Sem dados	-20,1%
	Aumento do nível de alimentação	50,50%	-13,8%	Sem efeito	-37,1%
Manipulação ruminal	Tanino e Mimosina	Sem efeito	-27,4%	Sem efeito	Sem dados

Tabela 4. Estratégias de mitigação bem-sucedidas e seu efeito médio (%) nas métricas de desempenho animal.

Estratégia		Consumo de matéria seca (CMS)	Produção de leite	Ganho médio diário (GMD)
Criação de animais	Composição de raça (ex. F1 Holandês x Gir)	41%	98,50%	65,10%
	Manejo adequado da lotação em pastejo rotacionado	15,10%	13,50%	70,50%
Manipulação da dieta	Aumento da proteína na dieta	Sem efeito	11,60%	Sem efeito
	Aumento do nível de concentrado (caroço de algodão)	26,10%	Sem dados	31,10%
	Aumento do nível de alimentação	66,70%	10,40%	171,40%
Manipulação ruminal	Tanino e Mimosina	50,90%	Sem efeito	Sem dados

Aplicando os modelos desenvolvidos

Um ponto-chave é a atuação tanto da Embrapa quanto do INCT-CA e instituições vinculadas, em parceria com a iniciativa privada e o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) em projetos voltados para a mitigação da emissão de metano entérico e, em consequência, para a redução da pegada de carbono. Equipes da Embrapa têm desenvolvido abordagens estruturadas, incluindo etapas como definição de ferramentas de cálculo, caracterização dos sistemas de produção, coleta de dados, análise crítica das pegadas de carbono, planejamento estratégico, construção de cenários, monitoramento e ajustes, além da compensação das emissões de GEE.

A colaboração com parceiros privados tem sido fundamental para o sucesso desses projetos, permitindo a aplicação prática de estratégias para redução da pegada de carbono em sistemas de produção de leite e de carne. As etapas incluem desde a definição das ferramentas de cálculo até a implementação de mudanças nos sistemas de

produção, visando a redução das emissões de GEE. Destaca-se também a importância do apoio do MAPA, fornecendo diretrizes e regulamentações que orientam esses esforços.

Os programas nacionais visam não apenas a redução das emissões de GEE, mas também o aumento da eficiência dos sistemas de produção. Isso inclui a otimização de diversos fatores de produção, incluindo o tamanho do rebanho, a adoção de tecnologias mitigadoras de GEE e o monitoramento contínuo dos sistemas para avaliar o progresso e realizar ajustes, conforme necessário.

A atuação nacional, viabilizada por investimentos públicos e privados, permite também amparar o Ministério da Agricultura e Pecuária e o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, para estabelecer os programas de produção “baixo carbono”, bem como para a elaboração dos inventários nacionais de GEE. Fica evidente o compromisso com a sustentabilidade e a busca por soluções inovadoras para enfrentar os desafios relacionados às mudanças climáticas e à produção agropecuária. Esses esforços são essenciais para garantir a viabilidade e a resiliência do setor diante dos desafios globais.

Considerações finais

Considerando os resultados obtidos nos estudos citados nesta breve revisão, é crucial destacar a importância da mensuração contínua, incluindo dados colhidos por meio de novas abordagens metodológicas e da geração de bancos de dados para aprimorar os modelos de predição e os inventários de GEE. A obtenção de dados precisos e abrangentes é essencial para refinar os entendimentos sobre os processos em estudo e, conseqüentemente, para melhorar a eficácia e a confiabilidade dos modelos utilizados. Portanto, é fundamental que esforços sejam direcionados para a coleta sistemática e consistente de dados relevantes, a fim de sustentar avanços contínuos na modelagem e na compreensão dos fenômenos.

Referências

- UNITED NATIONS GENERAL ASSEMBLY. **Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development**. New York, 2015. Disponível em: <https://www.refworld.org/legal/resolution/unga/2015/en/111816>. Acesso em: 9 jun. 2024.
- BEAUCHEMIN, K. A.; UNGERFELD, E. M.; ABDALLA, A. L.; ALVAREZ, C.; ARNDT, C.; BECQUET, P.; BENCHAAAR, C.; BERNDT, A.; MAURICIO, R. M.; MCALLISTER, T. A.; OYHANTÇABAL, W.; SALAMI, S. A.; SHALLOO, L.; SUN, Y.; TRICARICO, J.; UWIZEYE, A.; CAMILLIS, C. de; BERNOUX, M.; ROBINSON, T.; KEBREAB, E. Invited review: current enteric methane mitigation options. **Journal of Dairy Science**, v. 105, n. 12, p. 9297-9326, 2022. Doi: <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22091>.
- BENAOUDA, M.; MARTIN, C.; LI, X.; KEBREAB, E.; HRISTOV, A. N.; YU, Z.; YÁÑEZ-RUIZ, D. R.; REYNOLDS, C. K.; CROMPTON, L. A.; DIJKSTRA, J.; BANNINK, A.; SCHWARM, A.; KREUZER, M.; MCGEE, M.; LUND, P.; HELLWING, A. L. F.; WEISBJERG, M. R.; MOATE, P. J.; BAYAT, A. R.; PEIREN, K. J. S.; EUGÈNE, M. Evaluation of the performance of existing mathematical models predicting enteric methane emissions from ruminants: animal categories and dietary mitigation strategies. **Animal Feed Science and Technology**, v. 255, 114207, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ANIFEEDSCI.2019.114207>.
- CONGIO, G. F. de S.; BANNINK, A.; MOGOLLÓN, O. L. M. Enteric methane mitigation strategies for ruminant livestock systems in the Latin America and Caribbean region: a meta-analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, 127693, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127693>.
- CONGIO, G. F. S.; BANNINK, A.; MAYORGA, O. L.; RODRIGUES, J. P. P.; BOUGOUIN, A.; KEBREAB, E.; SILVA, R. R.; MAURÍCIO, R. M.; SILVA, S. C. da; OLIVEIRA, P. P. A.; MUÑOZ, C.; PEREIRA, L. G. R.; GÓMEZ, C.; ARIZA-NIETO, C.; RIBEIRO-FILHO, H. M. N.; CASTELÁN-ORTEGA, O. A.; ROSERO-NOGUERA, J. R.; TIERI, M. P.; RODRIGUES, P. H. M.; MARCONDES, M. I.; HRISTOV, A. N. Prediction of enteric methane production and yield in dairy cattle using a Latin America and Caribbean database. **Science of The Total Environment**, v. 825, 153982, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153982>.
- CONGIO, G. F. S.; BANNINK, A.; MAYORGA, O. L.; RODRIGUES, J. P. P.; BOUGOUIN, A.; KEBREAB, E.; CARVALHO, P. C. F.; BERCHIELLI, T. T.; MERCADANTE, M. E. Z.; VALADARES-FILHO, S. C.; BORGES, A. L. C. C.; BERNDT, A.; RODRIGUES, P. H. M.; KUVERA, J. C.; MOLINA-BOTERO, I. C.; ARANGO, J.; REIS, R. A.; POSADA-OCHOA, S. L.; TOMICH, T. R.; CASTELÁN-ORTEGA, O. A.; HRISTOV, A. N. Improving the accuracy of beef cattle methane inventories in Latin America and Caribbean countries. **Science of The Total Environment**, v. 856, 159128, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159128>.
- EMBRAPA. **Laboratório Multiusuário de Bioeficiência e Sustentabilidade da Pecuária (LMBS)**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/laboratorio-multiusuario-de-bioeficiencia-e-sustentabilidade-da-pecuaria>. Acesso em: 27 maio 2024.
- GE, M.; FRIEDRICH, J.; VIGNA, L. **4 charts explain greenhouse gas emissions by countries and sectors**. Washington: World Resource Institute, 2020. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>. Acesso em: 27 maio 2024.
- HRISTOV, A. N.; KEBREAB, E.; NIU, M.; OH, J.; BANNINK, A.; BAYAT, A. R.; BOLAND, T. M.; BRITO, A. F.; CASPER, D. P.; CROMPTON, L. A.; DIJKSTRA, J.; EUGÈNE, M.; GARNSWORTHY, P. C.; HAQUE, N.; HELLWING, A. L. F.; HUHTANEN, P.; KREUZER, M.; KUHLA, B.; LUND, P.; MADSEN, J.; MARTIN, C.; MOATE, P. J.; MUETZEL, S.; MUÑOZ, C.; PEIREN, N.; POWELL, J. M.; REYNOLDS, C. K.; SCHWARM, A.; SHINGFIELD, K. J.; STORLIEN, T. M.; WEISBJERG, M. R.; YÁÑEZ-RUIZ, D. R.; YU, Z. Symposium review: Uncertainties in enteric methane inventories, measurement techniques, and prediction models. **Journal of Dairy Science**, v. 101, n. 7, p. 6655-6674, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13536>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Geneve, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Global warming of 1.5°C**. Geneve, 2018. Special report. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/download/#full>. Acesso em: 27 maio 2024.

RIBEIRO, R. S.; RODRIGUES, J. P. P.; MAURÍCIO, R. M.; BORGES, A. L. C. C.; REIS E SILVA, R.; BERCHIELLI, T. T.; VALADARES FILHO, S. C.; MACHADO, F. S.; CAMPOS, M. M.; FERREIRA, A. L.; GUIMARAES JUNIOR, R.; AZEVÊDO, J. A. G.; SANTOS, R. D. dos; TOMICH, T. R.; PEREIRA, L. G. R. Predicting enteric methane production from cattle in the tropics. **Animal**, v. 14, n. 53, p. s438-s452, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731120001743>