



IMPACTO DA GENÉTICA BOVINA NA PRODUÇÃO DE METANO ENTÉRICO: ESTUDO COMPARATIVO DE RAÇAS ADAPTADAS AO BIOMA AMAZÔNICO.

MÁRCIA OLIVEIRA DOS SANTOS SALGADO

RESUMO

A pecuária é responsável por 14,5% das emissões globais de gases de efeito estufa, com 30% atribuídos ao metano entérico bovino. No bioma amazônico, condições ambientais críticas — como temperaturas elevadas, umidade alta e pastagens degradadas — intensificam essas emissões em 15% a 20% comparativamente a regiões temperadas. Este estudo comparou raças bovinas adaptadas ao bioma, como Caracu e Crioulo Amazônico, com variedades comerciais, como Nelore e Holstein, visando avaliar o impacto da genética na redução de CH₄. Metodologicamente, realizou-se uma revisão integrativa de 89 artigos publicados entre 2013 e 2024, indexados em bases como SciELO, PubMed e Google Scholar. Os estudos foram categorizados em cinco eixos temáticos: aditivos alimentares, sistemas de confinamento, contexto regional, sustentabilidade socioeconômica e métodos de mensuração. Dados quantitativos — como emissões de CH₄ e eficiência alimentar — e qualitativos — como percepções de produtores — foram sintetizados e analisados por meio de modelos de otimização multiobjetivo e meta-análises. Os resultados evidenciaram que raças adaptadas emitem entre 110 e 140 g de CH₄/dia, enquanto as comerciais atingem 160 a 320 g/dia. Essa diferença decorre de metabolismos 15% mais eficientes, microbiomas ruminais equilibrados — com predomínio de bactérias celulolíticas — e resistência 40% maior a parasitas. Polimorfismos genéticos, como DGAT1 e CAST, associados à digestibilidade de fibras, e a seleção por Consumo Alimentar Residual reduziram emissões em 15% a 25%. Cruzamentos estratégicos, como o Girolando (Holstein × Gyr), diminuíram emissões em 22% sem comprometer a produtividade leiteira. Conclui-se que a genética de raças adaptadas, aliada a técnicas genômicas e manejo sustentável, pode reduzir emissões em até 30%, sendo essencial para políticas de mitigação climática na Amazônia. Recomenda-se investir em pesquisas sobre raças locais subestudadas, como o Crioulo Amazônico, e ajustar metodologias de mensuração, como os modelos IPCC, para refletir realidades regionais.

Palavras-chave: Seleção genômica; Mudanças climáticas; Pecuária sustentável.

1 INTRODUÇÃO

A pecuária é uma das atividades humanas com maior impacto climático, respondendo por 14,5% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), dos quais 30% correspondem ao metano entérico, subproduto da fermentação ruminal em bovinos (Knapp *et al.*, 2014; Seif *et al.*, 2024). No bioma amazônico, esse cenário é intensificado por condições ambientais críticas: temperaturas médias entre 25°C e 28°C, umidade relativa acima de 80% e

ciclos de seca e chuva extremos, fatores que reduzem a eficiência alimentar e elevam as emissões de metano por quilograma de carne ou litro de leite produzido (Ku-Vera *et al.*, 2020; Camargo *et al.*, 2023).

A região ainda enfrenta desafios estruturais, como solos de baixa fertilidade, degradação de pastagens de 70% das áreas pastoris e alta incidência de parasitas gastrointestinais, condições que comprometem a eficiência produtiva e ampliam a emissão de metano por quilo de carne ou leite produzido (Rao *et al.*, 2015; Carvalho *et al.*, 2020). Estima-se que a recuperação de pastagens degradadas e a adoção de sistemas integrados poderiam reduzir em até 22% as emissões de GEE na pecuária local (Cruz, 2020).

Nesse contexto, as raças bovinas adaptadas ao bioma, como Caracu e Crioulo Amazônico, destacam-se por características fisiológicas únicas. Estudos demonstram que essas raças possuem metabolismo basal 15% mais eficiente que o de variedades comerciais, reduzindo a necessidade de ingestão de matéria seca e, consequentemente, a produção de metano (Osei-Amponsah *et al.*, 2019; Azevedo *et al.*, 2024). Além disso, apresentam resistência 40% maior a parasitas como *Haemonchus contortus*, minimizando perdas produtivas (Slayi *et al.*, 2023). Seu microbioma ruminal também é mais equilibrado, com predominância de bactérias celulolíticas e menor presença de arqueias metanogênicas, o que otimiza a conversão energética (Wallace *et al.*, 2017; Fregulia *et al.*, 2024).

Tabela 1. Comparação de emissões de CH₄ entérico, eficiência alimentar, resistência a parasitas e custos entre raças bovinas adaptadas e comerciais no bioma amazônico.

Variável	Raças Adaptadas	Raças Comerciais	Referência
Emissão de CH ₄ (g/dia)	110–140	160–320	(Villanueva <i>et al.</i> , 2023)
Eficiência Alimentar (RFI)	-0,45 kg MS*/dia	+0,30 kg MS*/dia	(Nkrumah <i>et al.</i> , 2006)
Resistência a Parasitas	60% menor infestação	40% menor infestação	(Slayi <i>et al.</i> , 2023)
Custo Marginal de Abatimento	-USD* 12/ton CO ₂ eq*	+USD* 8/ton CO ₂ eq*	(Cruz, 2020)

Nota:
- USD: Dólar Americano (*United States Dollar*).
- CO₂eq: Dióxido de Carbono Equivalente (*Carbon Dioxide Equivalent*).
Fonte: Autora (2025).

Em contraste, raças comerciais como o Nelore, selecionadas historicamente para ganho de peso rápido, emitem entre 160 e 320 gramas de metano por dia, valor significativamente superior ao de raças locais (Villanueva *et al.*, 2023). Essa diferença evidencia a urgência de estratégias de melhoramento genético que harmonizem produtividade e sustentabilidade.

A genômica surge como aliada nesse processo. Polimorfismos genéticos, como o gene (*Diacilglicerol O-Aciltransferase 1* - DGAT1) e (*Calpastatina* - CAST), associados à digestibilidade de fibras, e a seleção por Consumo Alimentar Residual (RFI - *Residual Feed Intake*) reduziram emissões em 15% a 25% (Gutierrez-Reinoso *et al.*, 2021; Baruselli *et al.*, 2023). No entanto, menos de 5% dos estudos sobre metano entérico focam em raças locais amazônicas, limitando o desenvolvimento de políticas públicas baseadas em evidências regionais (Azevedo *et al.*, 2024).

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo baseou-se em uma revisão integrativa de artigos científicos publicados entre 2020 e 2025, indexados nas bases SciELO, PubMed e Google Scholar, com foco em bovinos de corte em sistemas tropicais. Foram incluídas publicações em português, inglês e espanhol, totalizando 89 estudos. Desses, 22 foram selecionados após triagem por critérios de relevância temática e rigor metodológico. Os artigos foram categorizados em cinco eixos temáticos predefinidos: aditivos alimentares, sistemas de confinamento, contexto regional, sustentabilidade socioeconômica e métodos de mensuração de metano, visando abranger múltiplas dimensões do problema.

A extração de dados contemplou variáveis quantitativas de emissões diárias de CH₄, eficiência alimentar medida pelo Consumo Alimentar Residual - RFI e qualitativas de percepções de produtores sobre práticas sustentáveis. Para análise, utilizaram-se modelos matemáticos de otimização multiobjetivo (Costa *et al.*, 2024), capazes de equilibrar metas conflitantes como produtividade e redução de emissões, além de técnicas inovadoras de mensuração de sensores a laser e câmaras respiratórias ventiladas, validadas em estudos como os de Villanueva *et al.* (2023). Complementarmente, meta-análises (Da Silveira Bueno *et al.*, 2021) integraram resultados heterogêneos, identificando padrões globais e lacunas regionais.

A síntese dos dados foi organizada em tabelas comparativas e representações gráficas, utilizando planilhas eletrônicas para cruzamento de informações. Priorizou-se a validação cruzada entre fontes, contrastando dados experimentais de medições *in vivo* com modelos teóricos de fatores de emissão do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) Tier 2 ajustados para a Amazônia. Essa abordagem permitiu não apenas quantificar diferenças entre raças adaptadas e comerciais, mas também contextualizar resultados à luz de desafios locais, como degradação de pastagens e resistência a parasitas. A metodologia, portanto, combina rigor técnico e adaptabilidade às particularidades do bioma amazônico, garantindo robustez para embasar recomendações práticas e políticas públicas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção de metano entérico em bovinos é um fenômeno multifatorial, influenciado por características genéticas, interações com o microbioma ruminal e condições ambientais específicas. Nesta seção, os resultados são organizados em cinco eixos centrais, que abordam desde diferenças intrínsecas entre raças até estratégias de melhoramento genético aplicáveis ao bioma amazônico. A análise integra dados quantitativos, evidências genômicas e estudos de campo para responder como a genética bovina pode ser otimizada para reduzir emissões de CH₄ sem comprometer a produtividade. As discussões destacam não apenas contrastes entre raças comerciais e adaptadas, mas também implicações práticas para políticas de mitigação climática e sustentabilidade na pecuária tropical.

3.1. Diferenças Genéticas entre Raças

Bovinos da linhagem *Bos indicus* (Zebu), como o Nelore, apresentam adaptações evolutivas a climas tropicais, incluindo taxas metabólicas mais baixas e maior eficiência alimentar. Essas características resultam em emissões de metano entérico 20–30% menores em comparação com raças europeias (*Bos taurus*), como a Holstein. Estudos demonstram que vacas Holstein puras emitem até 410 g de CH₄/dia, enquanto cruzamentos estratégicos de Holstein × Gyr reduzem essa emissão para 296 g/dia, evidenciando o impacto positivo da genética mista na mitigação de gases de efeito estufa (Villanueva *et al.*, 2023).

Tabela 2. Dados comparativos de emissões, metodologias e fatores adaptativos de raças amazônicas vs. Comerciais.

Raça Comparada	Emissões de CH ₄ (g/dia)	Metodologia de Medição	Fatores Genéticos/Adaptativos	Fonte
Nelore (Bos indicus)	120–150	Câmaras respiratórias	Metabolismo basal reduzido; eficiência alimentar elevada.	(Kaewpila <i>et al.</i> , 2016)
Holstein (Bos taurus)	240–410	Sistema GreenFeed*+ SF6*	Alta ingestão de matéria seca; baixa adaptação térmica.	(Villanueva <i>et al.</i> , 2023)
Caracu	130–160	Calorimetria indireta	Tolerância a parasitas; digestibilidade de fibras elevada.	(Lage <i>et al.</i> , 2017)
Crioulo Amazônico	110–140*	IPCC Tier 2 (Valores ajustados para condições amazônicas)	Microbiota ruminal eficiente; resistência a doenças.	(Basso <i>et al.</i> , 2021)
Girolando (Holstein × Gyr)	238–296	Câmaras ventiladas	Equilíbrio produtividade-adaptação; menor CH ₄ por litro de leite.	(Fregulia <i>et al.</i> , 2024)

Nota:
- GreenFeed: Sistema automatizado de monitoramento de emissões de metano em tempo real.
- SF6: Hexafluoreto de Enxofre (*Sulfur Hexafluoride*), gás traçador utilizado em metodologias de medição.
Fonte: Autora (2025)

Um exemplo emblemático é o gado nativo tailandês da linhagem *Bos indicus*, que, apesar de emitir mais metano por unidade de alimento consumido, possui necessidades energéticas 15% menores que mestiços Charolês (*Bos taurus* × *Bos indicus*). Essa eficiência resulta em menor emissão total de CH₄, destacando a importância de selecionar animais adaptados a condições específicas (Subepang *et al.*, 2018).

3.2. Herdabilidade e Marcadores Genéticos

A produção de metano entérico é uma característica moderadamente hereditária, com valores de herdabilidade entre 0,13 e 0,35. Isso permite a seleção genética direcionada para fenótipos de baixa emissão (Mrutu *et al.*, 2023). Genes como DGAT1 (associado à digestibilidade de fibras) e CAST (ligado à eficiência metabólica) são alvos promissores para programas de melhoramento. O Consumo Alimentar Residual (RFI), por exemplo, é um critério chave: bovinos com RFI baixo emitem 15–25% menos CH₄ devido à redução na ingestão de matéria seca, sem comprometer o ganho de peso (Basarab *et al.*, 2013).

3.3. Microbioma Ruminal e Interação Genética

A composição microbiana do rúmen varia significativamente entre raças. Bovinos com maior abundância de arqueias metanogênicas como a *Methanobrevibacter ruminantium* tendem a apresentar emissões elevadas. Em contraste, raças adaptadas ao bioma amazônico, como o Caracu, possuem microbiomas dominados por bactérias celulolíticas como o *Ruminococcus flavefaciens*, que otimizam a conversão de energia e reduzem a produção de CH₄ (Wallace *et al.*, 2014). Essa interação entre genética do hospedeiro e microbiota abre caminho para estratégias de manejo ruminal integradas à seleção genética.

3.4. Estratégias de Melhoramento Genético

Cruzamentos estratégicos entre raças europeias de alta produtividade e linhagens *Bos indicus* adaptadas ao clima, surgem como solução equilibrada. O Girolando, Holstein × Gyr, por exemplo, emite 22% menos CH₄ anualmente que a Holstein pura, mantendo produtividade leiteira competitiva (Villanueva *et al.*, 2023). Paralelamente, a seleção assistida por

marcadores como polimorfismos de nucleotídeo único (*Single Nucleotide Polymorphisms* - SNPs) associados à baixa emissão acelera o desenvolvimento de linhagens sustentáveis, reduzindo o ciclo de melhoramento em até 50% (Gutierrez-Reinoso *et al.*, 2021).

3.5. Dados Quantitativos na Amazônia

Estudos regionais revelam que bovinos Zebu na Amazônia emitem em média 120 g de CH₄/cabeça/dia, enquanto raças não adaptadas como o Angus alcançam 161–323 g/dia (Kaewpila *et al.*, 2016). Esses dados expõem a subestimação do modelo IPCC, que atribui 6,5% (IPCC, 2006), atualizado para 7,0% (IPCC, 2019) de perda energética para bovinos tropicais, ignorando variações locais na qualidade das pastagens e na genética animal (Ku-Vera *et al.*, 2020). Ajustes metodológicos são urgentes para refletir a realidade amazônica e embasar políticas públicas precisas (Basso *et al.*, 2021).

4 CONCLUSÃO

A genética bovina exerce papel crítico na mitigação do metano entérico, com raças adaptadas ao bioma amazônico como Caracu e Crioulo Amazônico, apresentando vantagens significativas em eficiência alimentar e resiliência climática. A integração de técnicas genômicas, cruzamentos estratégicos e manejo sustentável de pastagens pode reduzir emissões em até 30%, conforme evidenciado por estudos com linhagens *Bos indicus* e mestiços. Recomenda-se priorizar programas de melhoramento que equilibrem produtividade e sustentabilidade, além de pesquisas futuras focadas em raças locais subestudadas, como o Crioulo Amazônico.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, A. R. et al. Explorando a Catrina, uma raça bovina autóctone dos Açores, para uma análise comparativa das emissões de metano com vacas leiteiras da raça Holandesa-Frísia. **Fronteiras na Ciência Animal**, v. 5, p. 1-11, 2024.
- BASARAB, J. A. et al. Redução das emissões de GEE por meio do melhoramento genético para eficiência alimentar: efeitos em características economicamente importantes e na produção de metano entérico. **Animal**, v. 7, p. 303-315, 2013.
- BASSO, L. S. et al. O orçamento de metano da Amazônia derivado de observações aéreas plurianuais destaca variações regionais nas emissões. **Comunicações Terra e Meio Ambiente**, v. 2, p. 1-13, 2021.
- CAMARGO, L. S. et al. Perspectivas de edição genética para a pecuária bovina em regiões tropicais e subtropicais. **Reprodução Animal**, v. 19, p. 1-16, 2023.
- CARVALHO, R.; AGUIAR, A. P.; AMARAL, S. Diversidade de sistemas de criação de gado e seus efeitos sobre a regeneração florestal em uma região central de produção de gado na Amazônia brasileira. **Mudança Ambiental Regional**, v. 20, p. 1-15, 2020.
- COSTA, R. et al. Modelos de otimização multiobjetivo aplicados à pecuária sustentável. **Agricultural Systems**, v. 215, p. 103-115, 2024.

CRUZ, G. F. Emissões de GEE na pecuária do leite brasileiro: custo marginal de abate para diferentes sistemas de produção e implicações políticas. Dissertação, **Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura**, Divisão de Biblioteca – dibd/esalq/USP, p. 1-160, 2020.

DA SILVEIRA BUENO, M. et al. Meta-análise de estratégias para redução de metano entérico em bovinos. **Livestock Science**, v. 244, p. 104-112, 2021.

FREGUIA, P. et al. Composição do microbioma ruminal e sua associação com a produção de metano em bovinos leiteiros criados em condições tropicais. **Molecular Biology Reports**, v. 51, p. 1-9, 2024.

GUTIERREZ-REINOSO, M.; APONTE, P. M.; GARCÍA-HERREROS, M. Análise Genômica, Progresso e Perspectivas Futuras na Seleção de Gado Leiteiro: uma revisão. **Animals: um periódico de acesso aberto do MDPI**, v. 11, p. 1-21, 2021.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. **Japão: IGES**, 2006.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. **Genebra: IPCC**, 2019.

KAEWPILA, C.; SOMMART, K. Desenvolvimento de modelos de fator de conversão de metano para gado zebuino alimentado com resíduos e subprodutos de culturas de baixa qualidade em regiões tropicais. **Ecologia e Evolução**, v. 6, p. 7422-7432, 2016.

KNAPP, J. R. et al. Revisão convidada: metano entérico na produção de gado leiteiro: quantificando as oportunidades e o impacto da redução de emissões. **Journal of Dairy Science**, v. 97, n. 6, p. 3231-3261, 2014.

KU-VERA, J. et al. Revisão: estratégias para mitigação do metano entérico em bovinos alimentados com forragens tropicais. **Animal: uma revista internacional de biociência animal**, p. s453-s463, v. 14 2020.

LAGE, H. F. et al. Produção de metano por duas raças de gado em condições tropicais. **Journal of Animal Science and Research**, v. 1, n. 1, p. 1-4, 2017.

MRTU, R. I. et al. Engenharia Microbiana para Mitigar Emissões de Metano em Ruminantes – Uma Revisão. **Faculty of Veterinary Medicine, Bayero University Kano**, Nigéria, p. 1-34, 2023.

OSEI-AMPONSAH, R. et al. Seleção Genética para Termotolerância em Ruminantes. **Animals: um periódico de acesso aberto do MDPI**, v. 9, p. 1-18, 2019.

RAO, I. M. et al. LivestockPlus - A intensificação sustentável de sistemas agrícolas baseados em forragem para melhorar os meios de subsistência e os serviços ecossistêmicos nos trópicos. **Pastagens Tropicais - Forrajes Tropicales**, v. 3, p. 59-82, 2015.

SEIF, S. K.; KIPKIRUI, E. Aproveitando as pastagens da Tanzânia para mitigar as emissões de metano da fermentação entérica do gado. **Revista Europeia de Ciências Teóricas e Aplicadas**, v. 2, p. 514-517, 2024.

SLAYI, M. et al. Produção de metano entérico e acúmulo de peso de vacas Nguni e Bonsmara criadas em diferentes condições de pastejo. **Pastoralismo**, v. 13, p. 1-9, 2023.

SUBEPANG, S. et al. Emissões entéricas de metano, partição de energia e eficiência energética de bovinos zebuínos alimentados com silagem de ração mista total. **Revista Asiática-Australiana de Ciências Animais**, v. 32, p. 548-555, 2018.

VILLANUEVA, C.; IBRAHIM, M.; CASTILLO, C. Emissões de metano entérico em vacas leiteiras com diferentes grupos genéticos nos trópicos úmidos da Costa Rica. **Animals: um periódico de acesso aberto do MDPI**, v. 13, p. 1-11, 2023.

WALLACE, R. J. et al. Aplicação de técnicas de metaômica para compreender as emissões de gases de efeito estufa provenientes do metabolismo ruminal. **Genética, Seleção, Evolução: GSE**, v. 49, p. 2 a 11, 2017.