

III SIMPÓSIO DE Investigação em produção animal

ORGANIZADORES:

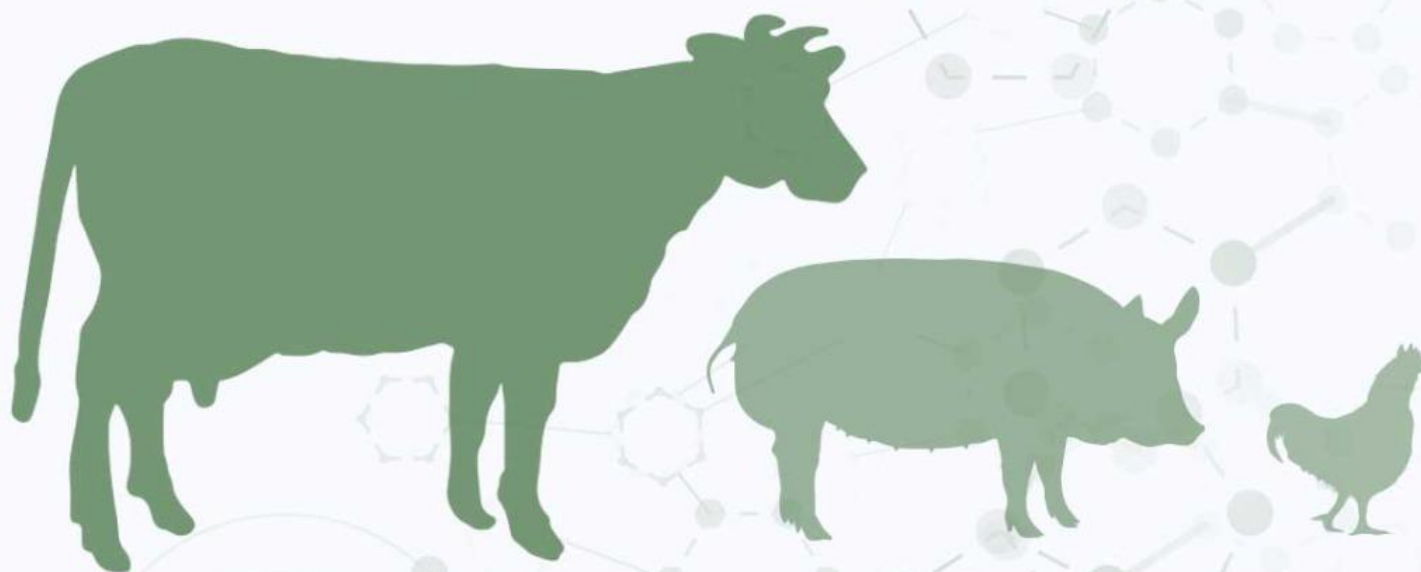
Thaise Pinto de Melo

Eduardo Bohrer de Azevedo

Leila Picolli da Silva

Juliana Medianeira Machado

Catarina Stefanello



PATROCINADORES E APOIADORES



ORGANIZADORES:

Thaise Pinto de Melo

Eduardo Bohrer de Azevedo

Leila Picolli da Silva

Juliana Medianeira Machado

Catarina Stefanello

III SIMPÓSIO DE

Investigação em produção animal

Canoas
2025



III Simpósio de Investigação em Produção Animal (SIPRA)

© 2025 Mérida Publishers

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-39-8>

Organizadores

Thaise Pinto de Melo

Eduardo Bohrer de Azevedo

Leila Picolli da Silva

Juliana Medianeira Machado

Catarina Stefanello

Adaptação da capa e desenho gráfico

Luis Miguel Guzmán



Canoas - RS - Brasil

contact@meridapublishers.com

www.meridapublishers.com

Todos os direitos autorais pertencem a Mérida Publishers. A reprodução total ou parcial dos trabalhos publicados, é permitida desde que sejam atribuídos créditos aos autores.



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

S593 III Simpósio de Investigação em Produção Animal [livro eletrônico] /
organização de Thaise Pinto de Melo... [et al.]. – 1. ed. –
Canoas, RS : Mérida Publishers, 2025.
il. color.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia.
ISBN 978-65-84548-39-8

1. Zootecnia. 2. Produção animal. 3. Pesquisa científica. 4.
Investigação acadêmica. 5. Simpósios. I. Melo, Thaise Pinto de. II.
Azevedo, Eduardo Bohrer de. III. Silva, Leila Picolli da. IV. Machado,
Juliana Medianeira. V. Stefanello, Catarina. VI. Título.
CDD 636

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Prefácio

É com grande alegria que apresentamos o III Simpósio de Investigação em Produção Animal! Para quem ainda não nos conhece, somos o Programa de Pós-Graduação em Zootecnia da Universidade Federal de Santa Maria (PPGZ-UFSM), um grupo apaixonado por ciência, animais e pelo desenvolvimento da nossa região. Aqui, no coração do Rio Grande do Sul, enfrentamos juntos os desafios do campo, buscando sempre soluções criativas e sustentáveis que façam a diferença para a produção animal. E é nesse espírito que nasceu o nosso Simpósio de Investigação em Produção Animal (SIPRA), visando promover a integração entre discentes, docentes e pesquisadores, além de servir como um canal para a divulgação interna e externa das pesquisas em desenvolvimento, fortalecendo a identidade e a coesão do programa.

Desde a primeira edição, percebemos que o SIPRA era mais que um evento: era um encontro. Um espaço onde os docentes e discentes podem compartilhar não apenas dados e resultados, mas também integrar os diferentes grupos de pesquisa sediados no Centro de Ciências Rurais, na Saúde e no campus de Palmeira das Missões. A segunda edição fortaleceu esses laços e mostrou o quanto podemos crescer quando trabalhamos unidos.

E agora, chegamos à nossa terceira edição, mais maduros, mais conectados e mais cheios de vontade de fazer acontecer. A presente publicação não é apenas um registro dos trabalhos apresentados, mas a materialização de uma comunidade acadêmica amadurecida, que entende que o compartilhamento de conhecimento é a chave para enfrentar os desafios contemporâneos e futuros da produção animal.

Com carinho,

A organização do III SIPRA.

Comissão organizadora

Thaise Pinto de Melo

Eduardo Bohrer de Azevedo

Leila Picolli da Silva

Juliana Medianeira Machado

Catarina Stefanello

Daniele Alves de Oliveira

Francine Basso Facco

Thaís Ferreira Machado

Joana da cruz carvalho

Saymon Silva Rocha

Leticia Minissi Winck

Fabielly de Jesus Depra Santos

Eliana Bordin Dutra

Eduarda Ribas de Oliveira

Eduarda Proença de Oliveira

Érica Dambros de Moura

Eduarda Jahnke Kepplin

Eduarda dos Santos Haas

Camila Tem Kathen Jung

Paola de Oliveira Selau

Raíssa Lixinski de Souza

Matheus Dutra Teixeira

Heloisa Furlani

Jeriel Dias

Índice

CAPÍTULO 1..... 10

Colina: um nutriente essencial para as aves

Catarina Stefanello, Eduarda A. Taschetto, Guilherme L. de Godoy, Fábio Luís Gazoni, Valéria Biselo, Natielli S. Witt

CAPÍTULO 2..... 22

Modulação intestinal de ruminantes: importância e ação dos aditivos naturais

Matheus Lehnhart de Moraes, Camila Ten Kathen Jung, Gilberto Vilmar Kozloski

CAPÍTULO 3..... 44

Pais desconhecidos em pedigrees de animais domésticos: abordagem e metodologias aplicadas

Daniele Alves, Saymon Rocha, Thais Machado, Jeriel Dias, Heloísa Furlani, Kettlen Neves, Sirlene Lazaro, Hinayah Rojas de Oliveira, Thaise Pinto de Melo

CAPÍTULO 4..... 61

Peso ótimo de abate de suínos no contexto da zootecnia de precisão

Dejanir Pissini, Marcos Luis Cassal, Paulo Santana Pacheco, Vladimir de Oliveira

CAPÍTULO 5..... 78

Tilapicultura: desafios, tendências e estratégias nutricionais sustentáveis

Gregorio Cargnin, Stéfane Sauzem Silva, Maurício Antônio Paz Martins, Diuly Bortoluzzi Falcone, Leila Picolli da Silva

CAPÍTULO 6..... 91

Uso de tecnologia portátil com inteligência artificial para análise de qualidade do leite diretamente em campo

Paola O. Selau, Francine B. Facco, Monique de L. Antunes, Nathália M. Veronezi, Andrieli Stefanello, Renan Cecchin, Pamela I. Otto, Julio Viégas

CAPÍTULO 7 107

O papel ensilagem nas emissões de gases na pecuária: causas e potenciais estratégias de mitigação

Francine B. Facco, Duvan S. Bautista, Eduarda R. de Oliveira, Maria E. P. Hamerski, Paola O. Selau, Leticia M. Winck, Monique Evelyn L. Pacheco, Julio Viégas, Tiago A. Del Valle

CAPÍTULO 8 123

Manejo de pastagens naturais do Bioma Pampa: impactos na produtividade forrageira e animal

Juliana Medianeira Machado, Camila Soares Martins, Dinah Pereira Abbott Rodrigues, Fernando Forster Furquim, Arthur Fernandes Bettencourt, Eduarda Gabriely de Souza, Fábio Pedrazzi de Vargas, Gabriele Da Roza dos Santos, Gustavo Pires Luft, João Vitor de Campos Aguiar, Maiani Vieira Domingues, Anna Vargas Magalhães, Maria Eduarda Cassol Vincensi, Daniel Pivotto Cerezer, Paula Montagner

CAPÍTULO 9 147

Princípios e potencial da tecnologia NIRS fecal para estimativas nutricionais de ruminantes em pastejo

Eliana Bordin Dutra, Lucas Biscaglia Miranda, Eduarda Jahnke Kepplin, Rafaela Rorato de Oliveira, Eduardo Bohrer de Azevedo

CAPÍTULO 10 169

Programação fetal em bovinos de corte: impactos da nutrição materna na produtividade da progênie

Raíssa Lixinski de Souza, Maurício Martins de Souza, Rodrigo Soares Volpatto, Matheus Dutra Teixeira, Dari Celestino Alves Filho

CAPÍTULO 11 180

Impacto do consórcio gramínea-leguminosa na dinâmica do carbono no solo e gases de efeito estufa

Monique Evelyn de Lima Pacheco, Francine Basso Facco, Paola de Oliveira Selau, Kamily Pech Oliveira, Amanda Zucheto, Caroline Frozza, Thainara Fagundes, Julio Viégas

CAPÍTULO 12..... 198

Suplementação energética em pastagens hibernais e seus efeitos no desempenho e na eficiência produtiva de bezerras de corte

Érica Dambros de Moura, Fabielly de Jesus Depra dos Santos, Eduarda Proença de Oliveira, Bruna Fernandes Machado, Dinah Pereira Abbott, Marta Gomes da Rocha, Luciana Pötter

CAPÍTULO 1

Colina: um nutriente essencial para as aves

Catarina Stefanello, Eduarda A. Taschetto, Guilherme L. de Godoy, Fábio Luís Gazoni, Valéria Biselo, Natielli S. Witt

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-39-8.c1>

Resumo

A colina é um nutriente essencial para aves, com funções importantes no metabolismo lipídico, na integridade celular, na saúde hepática, no desenvolvimento ósseo e na síntese de neurotransmissores. Dietas à base de milho e farelo de soja não suprem completamente as exigências nutricionais de colina para aves, sendo necessária a suplementação. A fonte sintética que é considerada padrão é o cloreto de colina líquido ou pó, porém essa forma apresenta limitações tecnológicas e menor biodisponibilidade. Em contrapartida, fontes de colina de origem vegetal, especialmente extratos ricos em fosfatidilcolina, já têm sido amplamente utilizadas e têm se mostrado mais eficazes, promovendo melhor desempenho zootécnico, menor acúmulo de gordura no fígado e maior estabilidade nas formulações. A escolha da fonte e do nível de inclusão de colina deve considerar a composição da dieta, a biodisponibilidade da fonte, as exigências de cada ave e os fatores fisiológicos. Pesquisas recentes indicam que o uso estratégico de colina herbal pode melhorar o desempenho produtivo e a saúde hepática de frangos de corte por ser mais biodisponível. Neste capítulo é abordada a importância da colina para aves e o uso estratégico de colina herbal com foco na produção de frangos de corte.

Palavras-chave: biodisponibilidade, colina herbal, desempenho zootécnico, frango.

1. Introdução

A colina é um nutriente indispensável para as aves e desempenha funções importantes no desenvolvimento ósseo, na saúde hepática e no metabolismo de lipídios e proteínas. É essencial para a maturação da matriz de cartilagem nos

ossos e para a síntese de fosfatidilcolina, sendo componente das membranas celulares e lipoproteínas (Mcdowell, 2008). A colina facilita a absorção e o metabolismo de gorduras, transportando e exportando triglicerídeos do fígado, prevenindo assim a síndrome do fígado gorduroso em frangos e atuando como agente lipotrópico (Selvam *et al.*, 2018). Adicionalmente, serve como precursor da acetilcolina, protege as células contra o estresse oxidativo e atua como doador de grupo metil, convertendo-se em metionina através da via de transmetilação no fígado (Wen *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2021).

É conhecido que as aves só sintetizam colina após 13 semanas de idade (Mcdowell, 2008); portanto, a colina é um nutriente necessário especialmente para frangos de corte e deve ser fornecida através da ração. O conteúdo colina total nos ingredientes da ração está em diferentes formas, que podem ser livres ou ligadas, incluindo fosfatidilcolina, fosfocolina, glicerofosfocolina e esfingomielina (Zeisel, 2009). A concentração de colina nos ingredientes também é variável, apresenta biodisponibilidade limitada e muitas vezes é difícil de analisar. A fosfatidilcolina consiste em uma molécula de colina ligada ao glicerol, unida a dois ácidos graxos e um grupo fosfato. Representa a forma primária de colina em materiais de origem animal ou vegetal. Embora relacionadas, às formas de colina e fosfatidilcolina diferem em estrutura e funções (Kanno *et al.*, 2007). Portanto, definir a fonte ótima e o nível de inclusão de colina requer conhecimentos sobre composição dos ingredientes, dos níveis de energia e nutrientes da dieta, da genética e das condições ambientais (NRC, 1994; Farina *et al.*, 2017).

O cloreto de colina em suas formas líquida ou pó é considerado a fonte padrão de colina para uso na avicultura; entretanto, fontes de colina de origem herbal ou vegetal têm sido cada vez mais utilizadas e avaliadas nos últimos anos. Esse uso está embasado na maior bioequivalência das fontes de origem vegetal, com melhores resultados de desempenho produtivo e saúde hepática das aves, além da facilidade de mistura (se comparadas ao cloreto de colina em pó) e da redução dos custos com transporte e armazenamento.

Dessa forma, existem novas fontes de colina que vem sendo disponibilizadas no mercado, o que indica que mais pesquisas devem ser realizadas para determinar a biodisponibilidade de novos produtos comerciais

para uso em rações para aves. A seguir, são apresentados resultados de pesquisas aplicadas realizadas pelo AvePRO (Grupo de Estudos em Nutrição e Produção de Aves) da UFSM, além de uma descrição sobre as funções da colina e da fosfatidilcolina para as aves, suas fontes e os contextos de aplicabilidade para frangos de corte.

2. Principais funções da colina para as aves comerciais

A colina é um nutriente essencial para aves, podendo estar presente em diferentes formas nos alimentos, sendo as mais relevantes a colina total e a fosfatidilcolina. Embora estejam metabolicamente relacionadas, essas formas apresentam diferenças importantes em estrutura química, biodisponibilidade e funções fisiológicas. A colina total refere-se à soma de todas as formas de colina presentes nos ingredientes, incluindo a colina livre e aquela ligada a outras moléculas, como fosfatidilcolina, fosfocolina, glicerofosfocolina, entre outras (Zeisel, 2009). Essas diferentes formas ocorrem em proporções variadas nos alimentos de origem vegetal e animal além de apresentarem diferente disponibilidade para as aves. No entanto, a quantificação precisa da colina total é desafiadora, pois requer processos laboratoriais de hidrólise das moléculas complexas, o que pode gerar variações nos resultados analíticos.

Entre essas formas, a fosfatidilcolina se destaca por sua relevância funcional e por sua maior biodisponibilidade. Estruturalmente, trata-se de um fosfolipídio composto por uma molécula de colina ligada a um grupo fosfato, a um glicerol e a dois ácidos graxos, estando presente principalmente nas membranas celulares e nas lipoproteínas. Essa estrutura confere à fosfatidilcolina uma grande importância na manutenção da integridade, fluidez e estabilidade das membranas celulares, influenciando diretamente a sinalização intracelular, o transporte de nutrientes e o funcionamento de receptores de membrana. Em frangos de corte, especialmente em fases de rápido crescimento, essa função estrutural é essencial para o desenvolvimento e regeneração celular.

A fosfatidilcolina desempenha papel central no metabolismo lipídico, sendo fundamental para a formação e secreção de lipoproteínas de muito baixa

densidade (VLDL) no fígado. A adequada produção de VLDL é necessária para o transporte de triglicerídeos do fígado para os tecidos periféricos, prevenindo o acúmulo de gordura hepática — condição comumente observada em aves sob estresse metabólico. Portanto, o fornecimento adequado de fosfatidilcolina na dieta pode auxiliar na prevenção da esteatose hepática e melhorar o desempenho zootécnico. Outro aspecto importante é sua contribuição para a proteção celular frente ao estresse oxidativo, uma vez que a maior integridade de membranas promovida pela fosfatidilcolina reduz os danos causados por radicais livres. Isso confere maior resiliência metabólica às aves, especialmente em situações desafiadoras, como altas temperaturas, infecções ou exposição a micotoxinas (Mcdowell, 2008).

Do ponto de vista prático, ingredientes com alto teor de fosfatidilcolina são considerados fontes superiores de colina, por apresentarem maior concentração da molécula ativa por unidade de massa e por liberarem colina de forma mais eficiente no organismo. Por isso, sua inclusão em dietas comerciais deve considerar fatores como estabilidade, absorção intestinal, custo-benefício e exigência fisiológica das aves. Em contextos de elevado desafio fisiológico, como crescimento acelerado, transição alimentar, estresse por calor ou quadros inflamatórios, o uso de fontes ricas em fosfatidilcolina pode contribuir significativamente para a saúde hepática, a eficiência produtiva e o bem-estar das aves.

Em termos gerais, a colina desempenha múltiplas funções metabólicas e estruturais fundamentais para o crescimento e a saúde dos animais. Abaixo, são brevemente relatadas as suas principais funções para as aves:

a) Síntese de fosfatidilcolina: é precursora da fosfatidilcolina, um dos principais componentes das membranas celulares e das lipoproteínas, sendo essencial para a integridade estrutural das células e para o transporte de lipídeos;

b) Transporte e metabolismo de gorduras: facilita o metabolismo lipídico ao participar da formação de lipoproteínas, que transportam gorduras no organismo das aves, evitando seu acúmulo em tecidos onde isso não é desejável;

c) Prevenção de fígado gorduroso: uma das funções mais conhecidas da colina é sua capacidade de prevenir a esteatose hepática (fígado gorduroso), ao auxiliar na exportação de triglicerídeos do fígado para a corrente sanguínea. Em termos práticos, além da saúde hepática, pode estar relacionada com a coloração do fígado e como consequência, maiores condenações de fígados em frigoríficos;

d) Síntese de acetilcolina: é precursora da acetilcolina, um importante neurotransmissor envolvido em funções neuromusculares, essenciais para o comportamento, locomoção e função intestinal das aves;

e) Metabolismo da metionina: atua como doadora de grupos metil no metabolismo da metionina, participando da metilação de compostos importantes no organismo, o que impacta o crescimento e o desenvolvimento celular;

f) Desenvolvimento ósseo: está envolvida na formação e mineralização óssea, contribuindo para o adequado desenvolvimento do esqueleto das aves. Possibilita melhor formação de cartilagens e ossos, o que é necessário para uma locomoção normal e indispensável para o consumo de ração, de água e o crescimento das aves.

3. Fontes de colina em rações para aves

As diferentes fontes de colina podem ser utilizadas como ingredientes com matriz nutricional, ou suplementadas diretamente nas rações, ou via premix. Quando estamos abordando nutrientes essenciais, há um interesse crescente em reavaliar as exigências de colina para aves, uma vez que níveis dietéticos elevados de colina têm sido associados a melhorias no desempenho produtivo. No entanto, a maioria dos estudos que avaliaram as exigências de colina foram realizados há várias décadas (Pesti *et al.*, 1980; Baker *et al.*, 1983). As diretrizes do NRC (NRC, 1994) recomendaram 1.300 mg/kg de colina total para frangos até 21 dias e 1.000 mg/kg dos 22 aos 42 dias de idade. Uma pesquisa mais recente, de Pompeu *et al.* (2013), relatou melhora na conversão alimentar em frangos de 21 dias alimentados com uma dieta basal contendo 1.357 mg/kg de colina total suplementada com 400 mg/kg de cloreto de colina 60%.

Mais recentemente, as exigências de colina de frangos de corte de genéticas atuais com alto rendimento foram atualizadas para garantir a ingestão adequada e o desempenho otimizado. A Cobb-Vantress (2022) recomendou 500, 400 e 350 mg/kg de cloreto de colina para as fases inicial, crescimento e final, respectivamente, enquanto a Aviagen (2022) sugeriu níveis totais de colina de 1.700, 1.600 e 1.500 mg/kg para essas mesmas fases. Com base nas recomendações atuais, dietas à base de milho e farelo de soja não atendem as exigências de colina para crescimento normal, sendo necessária a suplementação ou inclusão de fontes de colina nas dietas. Portanto, ao definir a fonte ideal de colina e os níveis de inclusão nas formulações de rações para aves, fatores como a composição dos ingredientes, os níveis de energia e nutrientes da dieta, os tipos de ingredientes em uma ração e seus níveis, a fase alimentar, a genética e as condições ambientais devem ser cuidadosamente considerados.

A quantidade de colina e sua disponibilidade nos ingredientes são variáveis. Nossas amostras na UFSM mostraram valores analisados de 166, 242 e 2.310 mg/kg de colina total em glúten de milho, quirera de arroz e farelo de soja, respectivamente. As tabelas do NRC suínos (NRC, 2012) trazem valores de colina total para ingredientes em que são descritos: 330, 1.003 e 2.710 mg/kg de colina total em glúten de milho, quirera de arroz e farelo de soja, respectivamente. Os valores de colina no milho, trigo, farelo de trigo e proteína isolada de soja foram: 620, 778, 1.232, 1.318 mg/kg, respectivamente. Dietas à base de milho e farelo de soja não geram deficiências severas em colina, mas também não atendem completamente às exigências nutricionais de colina, necessitando inclusão ou suplementação.

Na determinação das exigências nutricionais e também para comparações entre fontes de colina, é importante analisar a concentração total de colina nas dietas-controle para garantir que elas sejam formuladas com níveis deficientes do nutriente testado. Isso permite avaliar o efeito da inclusão de níveis crescentes de colina nas dietas para os frangos de corte. Quando fontes de colina são comparadas, níveis marginais de colina devem ser testados para que seja possível observar os efeitos dos níveis crescentes de cada fonte de colina, além da avaliação do teor de fosfatidilcolina em uma fonte de colina herbal

que é indispensável para esses estudos. As rações não devem ser totalmente deficientes em colina para permitir que os frangos apresentem taxas de crescimento mais próximas ao padrão esperado. Os valores calculados de colina devem ser considerados e as rações devem ser analisadas para conhecimento das concentrações de colina total.

O cloreto de colina é a fonte padrão de colina nas rações para aves; no entanto, fontes de colina de origem herbal têm sido utilizadas em todo o mundo. No Brasil, a maioria das fontes de colina utilizadas nas agroindústrias já é composta por colina herbal. Isso se deve porque o uso de cloreto de colina como ingrediente é desafiador devido à sua alta higroscopicidade, dificuldade em alcançar uma mistura uniforme na ração, teor de cloreto e interações com vitaminas que podem levar à oxidação das vitaminas (Dias *et al.*, 2023). Adicionalmente, como ingrediente sintético, o cloreto de colina está menos alinhado com as práticas sustentáveis atuais e demonstrou menor biodisponibilidade em comparação com fontes alternativas (Farina *et al.*, 2017). Consequentemente, o cloreto de colina exige níveis de inclusão mais elevados nas formulações de ração para atender as exigências nutricionais, aumentando assim as demandas logísticas relacionadas ao transporte e armazenamento.

Fontes herbais de colina oferecem outra forma de colina para dietas de aves, e os produtos comerciais são extratos derivados comumente de plantas como *Citrullus colocynthis*, *Achyranthes aspera* e *Andrographis paniculata*. Esses produtos naturais, ricos em fosfatidilcolina, que é mais prontamente absorvida, contêm altos níveis de colina esterificada, e mostraram maior biodisponibilidade, melhor desempenho e menor conteúdo de gordura no fígado de frangos de corte (Calderano *et al.*, 2015; Farina *et al.*, 2017; Khose *et al.*, 2019).

4. Resultados relevantes da utilização de fontes de colina e sua aplicabilidade

Na nossa pesquisa realizada na UFSM, foram avaliados níveis crescentes de cloreto de colina 60% (0, 200, 400 e 600 mg/kg) e de uma nova fonte comercial de colina herbal (0, 100, 200 e 300 mg/kg). As dietas foram formuladas

com farelo de soja, quirera de arroz e glúten de milho como ingredientes principais, em níveis de colina total analisada de 1.010 e 1.020 mg/kg na ração inicial (1 a 14 dias) e crescimento (14 a 34 dias), respectivamente. Foram avaliados os efeitos de ambas as fontes sobre desempenho produtivo de frangos de corte até 34 dias de idade, além de avaliações em rendimento de carcaça, locomoção das aves e características do fígado. Para determinar a bioequivalência da colina herbal (fonte alternativa) em relação ao cloreto de colina (fonte padrão) foram estimadas equações de regressão para os coeficientes angulares (Taschetto *et al.*, 2025).

Observou-se que a colina herbal apresentou maior bioequivalência do que o cloreto de colina. Valores de bioequivalência de 2,88 e 3,34 foram obtidos para o ganho de peso (GP) de 1 a 21 dias e de 1 a 28 dias, respectivamente. Na conversão alimentar (CA), os valores de bioequivalência foram de 2,23 e 2,88 para os períodos de 1 a 21 dias e de 1 a 28 dias, respectivamente. No período total, a bioequivalência para o GP foi de 2,43, enquanto para a CA foi de 2,30 (Taschetto *et al.*, 2025).

Como essa é uma fonte nova de colina que foi registrada para o mercado brasileiro, nenhuma pesquisa anterior avaliou este produto comercial em aves no Brasil. Portanto, nossos achados foram comparados a outros produtos de colina comercializados, provenientes de extratos herbais semelhantes. Farina *et al.* (2017) conduziram um estudo semelhante em que frangos foram alimentados até os 28 dias com uma dieta controle contendo quirera de arroz, farelo de soja e glúten de milho para determinar a bioequivalência de uma outra fonte de colina herbal em relação ao cloreto de colina. Com base na melhora da CA entre os dias 15 e 28 dias, os autores concluíram que a equivalência calculada da colina herbal em relação ao cloreto de colina foi de 1:2,52, sendo que o produto testado possuía fosfatidilcolina extraída principalmente de *Achyranthus aspera*, *Azadirachta indica*, *Citrullus colocynthis* e *Trachyspermum amni*.

A inclusão adequada de colina previne perose e condrodisplasia ao atuar na proliferação de condrócitos e no alongamento ósseo (Wen *et al.*, 2016). Muitas vezes, os problemas de locomoção e de patas em aves são atribuídos a outros fatores nutricionais ou a fatores exclusivamente genéticos, porém sabendo da importância da colina no metabolismo ósseo, seus efeitos passaram

a ser cada vez mais considerados. Desvios nas pernas como valgo e varo, pior *gait score* (escore de marcha) e incidência de perose são condições que podem estar relacionadas com a baixa oferta de colina nas dietas, especialmente para frangos de corte. Consequentemente, pode influenciar a mobilidade, o consumo de ração, o desempenho produtivo e também o bem-estar das aves.

Em nosso experimento, foi observado que em frangos de corte aos 34 dias de idade, o escore de locomoção foi influenciado pela colina dietética, sendo o pior escore observado no grupo controle (sem colina suplementar) e os melhores escores registrados em frangos alimentados com 200 e 300 mg/kg de colina herbal ou 400 mg/kg de cloreto de colina. O escore de marcha também aumentou de 28 para 34 dias, em que escores maiores são indicativos de pior locomoção. Embora os escores de locomoção tenham sido, no geral, baixos e dentro da faixa normal, a suplementação de colina na dieta melhorou a locomoção dos frangos tanto aos 28 quanto aos 34 dias (Taschetto *et al.*, 2025).

A função hepática também tem sido associada com o consumo de níveis adequados de colina, em nosso experimento, o teor de gordura hepática diminuiu com a suplementação de 200 e 300 mg/kg de colina herbal, o que foi associado a um aumento da coloração vermelha do fígado. Foram necessárias quantidades mais altas de cloreto de colina, especificamente 600 mg/kg, para alcançar uma redução semelhante no percentual de gordura. Fígado com coloração mais vermelha, pode ser indicativo de menor % de gordura e também de melhor saúde. A coloração do fígado pode ser alterada por outros fatores como deficiências nutricionais, altos percentuais de gordura nas rações, jejum pré-abate, ingestão de aflatoxinas em rações, infecções bacterianas ou virais, estresse térmico, entre outros. Em termos práticos, fígados com coloração mais amarela (mais pálida) e menos vermelha poderão ser condenados pelo serviço veterinário de inspeção em abatedouros, causando perdas econômicas.

Avaliando colina herbal de outras fontes, estudos anteriores também observaram redução no conteúdo lipídico hepático devido ao seu efeito lipotrópico (Selvam *et al.*, 2018). Assim, a colina é amplamente conhecida como agente lipotrópico, promovendo a utilização de gordura e facilitando a remoção da gordura hepática na forma de lipoproteínas, direcionando-a para tecidos extra-hepáticos (Kettunen *et al.*, 2001). Fontes de fosfatidilcolina aumentam a

absorção de colina e melhoram a função hepática, potencialmente levando a melhor GP e CA, à medida que o excesso de energia proveniente da gordura é redirecionado para o acúmulo de proteína muscular em vez da síntese de gordura corporal.

5. Considerações finais

Após a determinação da bioequivalência de uma fonte de colina em relação ao cloreto de colina, observou-se que a colina herbal é uma alternativa viável ao cloreto de colina em dietas para frangos de corte. Níveis crescentes de colina herbal promoveram melhorias no ganho de peso e na conversão alimentar, intensificaram a coloração do fígado, reduziram o teor de gordura hepática e diminuíram os problemas locomotores nas aves.

Os estudos desenvolvidos pelo AvePRO na UFSM são tecnicamente importantes e práticos pois conectam ciência e pesquisa com a aplicabilidade prática da nutrição de aves em um contexto nacional e global. Estas avaliações atendem as demandas de empresas, de nutricionistas, consultores e principalmente das agroindústrias e cooperativas do país. Isso contribui para o crescimento e a manutenção da qualidade da produção de aves e contribui para a formação e o desenvolvimento dos discentes do Programa de Pós-graduação em Zootecnia da UFSM.

6. Referências bibliográficas

- AVIAGEN. 2022. Ross broiler nutrition specifications. **Aviagem**, Huntsville, AL.
- BAKER, H. David *et al.* The choline-methionine interrelationship for growth of the chick. **Poult. Sci.** 62:133–137, 1983. <https://doi.org/10.3382/ps.0620133>.
- CALDERANO, A. Arele *et al.* Replacement of choline chloride by a vegetal source of choline in diets for broilers. **Cienc. Anim. Bras.** 16:37–44, 2015. <https://doi.org/10.1590/1089-6891v16i127404>.
- COBB-VANTRESS. Cobb500 broiler management supplement. **Cobb-Vantress**, Siloam Springs, AR, 2022.
- DIAS, G. F Allan. *et al.* Effects of herbal choline as a replacement for choline chloride on myopathy, locomotor system, and hepatic health of broilers. **Rev. Bras. Zootec.** 52:20220177, 2023. <https://doi.org/10.37496/rbz5220220177>.

- FARINA, Giovani. *et al.* Performance of broilers fed different dietary choline sources and levels. **Ciência Animal Brasileira**. 18:1–14, 2017. <https://doi.org/10.1590/1089-6891v18e-37633>.
- KANNO, Keishi. *et al.* Structure and function of phosphatidylcholine transfer protein (PC-TP)/StarD2. **Biochim. Biophys. Acta**. 12;1771(6):654–662, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.bbailip.2007.04.003>.
- KETTUNEN, Hannele *et al.* Intestinal uptake of betaine in vitro and the distribution of methyl groups from betaine, choline, and methionine in the body of broiler chicks. **Comp. Biochem. Physiol. A Mol. Integr. Physiol.** 128:269–278, 2001. [https://doi.org/10.1016/S1095-6433\(00\)00301-9](https://doi.org/10.1016/S1095-6433(00)00301-9).
- KHOSE, Kakasaheb *et al.* Replacement of synthetic choline chloride by herbal choline in diets on liver function enzymes, carcass traits, and economics of broilers. **J. Anim. Res.** 9:87–93, 2019. <https://doi.org/10.30954/2277-940X.01.2019.12>.
- MCDOWELL, L. R. Vitamins in animal and human nutrition. **2nd ed. Iowa State University Press, Ames, IA**. 2018. Disponível em: http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/facultad_agronomia/Produccion_Animal/Vitamins_in_Animal_and_Human_Nutrition.pdf
- NRC. Nutrient requirements of poultry. **9th rev. ed. Natl. Acad. Press**, Washington, DC. 1994.
- NRC. Nutrient requirements of swine. **11th rev. ed. Natl. Acad. Press**, Washington, DC. 2012.
- PESTI, G.M., A. E. HARPER, and M. L. SUNDE. Choline/methionine nutrition of starting broiler chicks: three models for estimating the choline requirement with economic considerations. 1980. **Poult. Sci.** 59:1073–1081. <https://doi.org/10.3382/ps.0591073>.
- POMPEU, M. A. *et al.* Suplementação de colina em dietas para frangos de corte machos em fase de crescimento. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.** 65:1836–1842, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352013000600035>.
- SELVAN, Ramasamy *et al.* Evaluation of polyherbal formulation and synthetic choline chloride on choline deficiency model in broilers: implications on zootechnical parameters, serum biochemistry and liver histopathology. Asian-Australas. **J. Anim. Sci.** 31:1795–1806, 2018. <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0018>.
- TASCHETTO, A. Eduarda. Bioequivalence of a commercial polyherbal choline for replacement of choline chloride for broiler chickens. **J. Appl. Poult. Res.** 34:100347, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2025.100571>.
- WEN, Z. G. *et al.* Effects of dietary methionine levels on choline requirements of starter white Pekin ducks. Asian-Australas. **J. Anim. Sci.** 29:1742–1747, 2016. <https://doi.org/10.5713/ajas.15.0729>.

YANG, Min *et al.* Choline attenuates heat stress-induced oxidative injury and apoptosis in bovine mammary epithelial cells by modulating PERK/Nrf-2 signaling pathway. **Mol. Immunol.** 135:388–397, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.molimm.2021.05.002>.

ZEISEL, H. Steven. Importance of methyl donors during reproduction. **Am. J. Clin. Nutr.** 89:673–677, 2009. <https://doi.org/10.3945/ajcn.2008.26811D>.

Autores

Catarina Stefanello, Eduarda A. Taschetto, Guilherme L. de Godoy, Fábio Luís Gazoni, Valéria Biselo, Natielli S. Witt

Departamento de Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

CAPÍTULO 2

Modulação intestinal de ruminantes: importância e ação dos aditivos naturais

Matheus Lehnhart de Moraes, Camila Ten Kathen Jung, Gilberto Vilmar Kozloski

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-39-8.c2>

Resumo

O epitélio intestinal, além de atuar como barreira física contra patógenos, está intimamente relacionado a mecanismos imunorreguladores que asseguram o equilíbrio entre a microbiota e a resposta imune do hospedeiro. Nesse sentido, são utilizados aditivos naturais capazes de modular positivamente a saúde intestinal. O objetivo dessa revisão de literatura é apresentar os principais aspectos da fisiologia intestinal dos ruminantes, com ênfase na função imunorreguladora do trato gastrointestinal, e discutir o potencial modulador dos principais aditivos naturais. A integridade intestinal depende da ação conjunta de processos fisiológicos e imunológicos, sendo modulada por fatores nutricionais e pela interação com a microbiota. As evidências demonstram que a utilização de aditivos naturais representa uma alternativa promissora para a saúde intestinal, além da redução da dependência de antimicrobianos, o que resulta em um sistema de produção eficiente. Dentre os principais aditivos naturais utilizados atualmente com ação intestinal são os taninos, prebióticos, probióticos, óleos essenciais, butirato e adsorventes de toxinas. Contudo, compreender a fisiologia intestinal e os mecanismos de ação desses aditivos é fundamental para desenvolver estratégias nutricionais mais sustentáveis e eficazes na agropecuária moderna.

Palavras-chave: aditivos naturais, fisiologia intestinal, imunorregulação, microbiota, modulação intestinal, ruminantes.

1. Introdução

Os ruminantes mantêm uma relação simbiótica com o ecossistema microbiano do rúmen, que possibilita a fermentação da celulose e a produção de ácidos graxos voláteis, principal fonte de energia para o hospedeiro. O avanço da pesquisa aumentou a eficiência do aproveitamento dos nutrientes pelos

ruminantes, especialmente pela diluição das exigências de manutenção. Tradicionalmente, a pesquisa concentrou-se no rúmen, desenvolvendo sistemas nutricionais e aditivos como a monensina. Atualmente, há necessidade de expandir o foco para outros órgãos, como o intestino, reconhecido como um órgão sensorial essencial na fisiologia (Bravo e Wall, 2016).

A saúde intestinal é um pilar essencial para o equilíbrio fisiológico dos ruminantes, sendo a microbiota intestinal determinante tanto para a manutenção da integridade epitelial quanto para a regulação das respostas imunes. Um microbioma equilibrado atua como linha de defesa contra microrganismos patogênicos, auxilia na manutenção da homeostase imunológica e fortalece a barreira intestinal por meio de interações complexas entre microrganismos, seus metabólitos e as células do epitélio (Yue *et al.*, 2023).

Neste contexto, torna-se imprescindível aprofundar o entendimento das interações entre a nutrição, o microbioma intestinal e a fisiologia do hospedeiro, de modo a fundamentar novas estratégias que promovam ganhos de eficiência produtiva aliados à manutenção da saúde animal. A ampliação do enfoque tradicional, que por décadas privilegiou o rúmen, para incluir o papel central do intestino como órgão integrador e modulador de processos metabólicos e imunológicos, representa um avanço conceitual relevante. Essa perspectiva oferece bases sólidas para o desenvolvimento de abordagens nutricionais inovadoras, capazes de sustentar a intensificação sustentável na nutrição de ruminantes diante dos desafios científicos e produtivos contemporâneos. Portanto, objetivou-se realizar uma revisão sobre a modulação do intestino em ruminantes, assim como a ação dos principais aditivos aplicados atualmente.

2. Desenvolvimento

2.1. Fisiologia intestinal dos ruminantes

A digestão dos ruminantes começa no rúmen, onde os microrganismos e os movimentos mecânicos quebram as fibras dos alimentos. Posteriormente, o retículo e o omaso auxiliam na trituração e absorção, enquanto no abomaso, chamado de “verdadeiro estômago”, ocorre a digestão gástrica. No duodeno, o quimo recebe enzimas do pâncreas e da bile, o que continua a digestão. O

intestino delgado, com suas vilosidades, é responsável por absorver a maior parte dos nutrientes. O restante vai para o intestino grosso, onde ocorre mais fermentação no ceco, até formar as fezes, que são eliminadas pelo reto. O intestino delgado é composto pelo duodeno, jejuno e íleo, já o intestino grosso é formado pelo ceco, cólon e reto (Liu *et al.*, 2023).

A população microbiana intestinal desempenha papel crucial no metabolismo de nutrientes, complementando a digestão realizada no rúmen. No intestino grosso, onde o trânsito é mais lento, ocorre a fermentação de fibras residuais, estudos demonstram que aproximadamente 30% da fibra, xilose e hemicelulose são fermentadas e decompostas no intestino posterior, indicando que este processos de fermentação também é uma fonte de energia essencial para as vacas (Zhu *et al.* 2021). Os microrganismos, principalmente dos filos *Bacteroidetes*, *Firmicutes*, *Proteobacteria* e *Actinobacteria*, produzem enzimas especializadas capazes de degradar compostos complexos e gerar ácidos graxos de cadeia curta (AGCC). Esses metabólitos não apenas fornecem energia, mas também participam da regulação do metabolismo energético, lipídico e proteico, além de influenciar a imunidade. A microbiota intestinal também sintetiza moléculas como colina e carnitina, associadas ao metabolismo de lipídios e à síntese de gordura do leite. Em conjunto, essas funções evidenciam que o microbioma intestinal, ao lado do rúmen, é determinante para a eficiência produtiva e para a saúde dos ruminantes (Liu *et al.*, 2023).

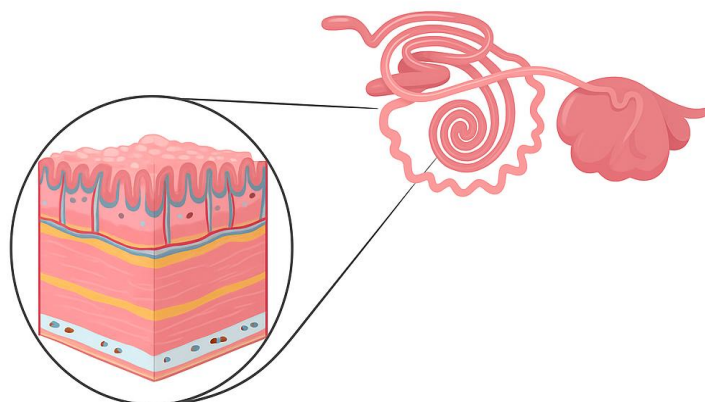


Figura 1. Sistema digestório dos ruminantes, na aproximação do epitélio intestinal. Fonte: Imagem criada com Biorender.com

O intestino dos ruminantes é composto por uma comunidade microbiana extremamente diversificada, composta por microrganismos que, em sua maioria, estabelecem interações mutualísticas com o hospedeiro. Entre essas interações, destacam-se a fermentação de carboidratos, resultando na produção de ácidos graxos de cadeia curta (AGCC), como acetato, propionato e butirato (Kozloski, 2022). Esses metabólitos exercem papel central tanto no fornecimento de energia quanto na regulação de processos fisiológicos associados à saúde intestinal.

A microbiota bacteriana do trato gastrointestinal (TGI) dos mamíferos é predominantemente composta por dois filos principais: *Bacteroidetes* e *Firmicutes* (Karlsson, 2011). No entanto, outros filos também ocupam nichos específicos, variando conforme a espécie animal, o que torna a comunidade microbiana do TGI única para cada hospedeiro. De acordo com Uyeno et. al (2015) a composição microbiana do trato gastrointestinal dos ruminantes pode ser modificada por vários fatores como dieta, idade e estresse, como um resultado adaptativo da comunidade ao ambiente.

Segundo Liu et al. (2014) relataram que a dieta rica em grãos (HG) em cabras reduziu o pH cecal e aumentou as concentrações de AGV, ácido láctico e lipopolissacarídeos (LPS), intensificando a fermentação no intestino grosso. Essa dieta alterou significativamente a composição bacteriana do lúmen e da mucosa cecal, além de provocar lesões epiteliais. As correlações indicam que mudanças no pH, na concentração de LPS e na microbiota contribuem para a inflamação local, fornecendo novas perspectivas sobre os mecanismos que levam a distúrbios do intestino posterior.

O aumento da acidez pode resultar em danos e descamação das células epiteliais do intestino grosso (Gressley et al., 2011). Além disso, o epitélio intestinal é composto por apenas uma única camada de células epiteliais, enquanto o epitélio do rúmen consiste em um epitélio escamoso multicamadas com queratinização significativa (Plaizier et al., 2012). Assim, as diferenças entre as estruturas dos epitélios tornam o epitélio intestinal mais suscetível a danos do que o rúmen durante a alimentação com HG.

2.2. Função imunorreguladora intestinal

O epitélio intestinal constitui uma linha de defesa contra agentes patogênicos e agentes externos nocivos. A barreira constituída pela mucosa pode ser destruída por inúmeras doenças e por vários agentes patógenos permitindo a passagem indiscriminada de antígenos através das juntas epiteliais. O muco contribui para a defesa celular, criando uma barreira física e prevenindo a adesão de bactérias (Groschwitz e Hogan, 2009).

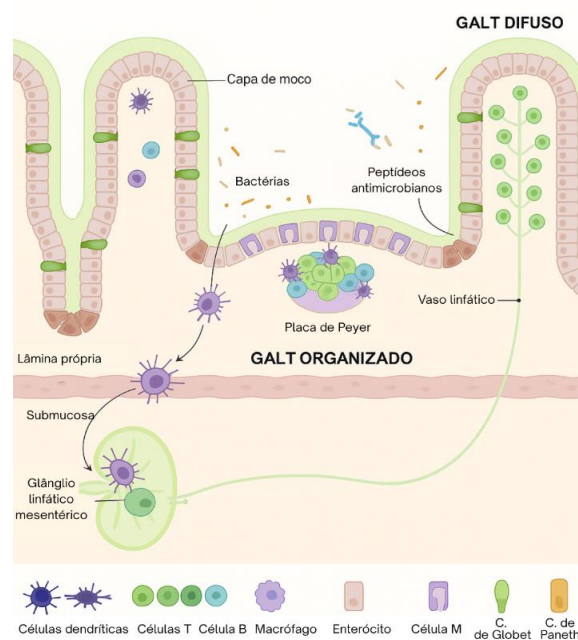


Figura 2. A organização do tecido linfóide associado à mucosa dentro do tecido intestinal, bem como a localização das células imunes dentro dele. (Fonte: Adaptado de Felix, 2021).

O sistema imunológico da mucosa é composto por quatro elementos principais (Figura 2): microbioma, camada de muco, barreira epitelial e células imunes associadas à mucosa (MALT). O MALT é o principal local de ativação da imunidade da mucosa e está presente em várias regiões do organismo. Ele inclui o GALT (intestino), BALT (brônquios), NALT (nariz) e tecidos linfóides em útero, trato urinário, glândulas mamárias, lacrimais e salivares. Esses tecidos contêm agregados de células de defesa (linfócitos B e T, células dendríticas e macrófagos), cobertos por células especializadas chamadas células M, que capturam e transportam antígenos (Vlasova e Saif, 2021).

O GALT é o maior órgão linfóide, responsável por lidar com grande variedade de antígenos de alimentos e microrganismos. As células M levam os antígenos para serem processados e apresentados aos linfócitos, que então produzem IgA. Linfócitos ativados podem migrar pela corrente sanguínea e se instalar em diferentes mucosas, formando o chamado “sistema imunológico da mucosa comum”. Um exemplo é o eixo intestino-mamário em bovinos, que permite a migração de células de defesa e componentes bacterianos até a glândula mamária, protegendo o bezerro por meio do leite (Vlasova e Saif, 2021).

2.3. Principais aditivos moduladores intestinais

2.3.1. Taninos

Os taninos são compostos fenólicos secundários presentes em diversas espécies vegetais, como *Acacia mearnsii* e *Schinopsis spp.* (quebracho), amplamente estudados na nutrição de ruminantes devido ao seu potencial em modular a fermentação ruminal e a saúde intestinal. Podem ser classificados como taninos hidrolisáveis e taninos condensados (Tedeschi *et al.*, 2021).

Os taninos hidrolisáveis (THs) são compostos solúveis em água, com massas moleculares entre 500 e 5000 Daltons (Da). Eles reagem como fenóis e podem precipitar proteínas e alcalóides. Quimicamente, são formados por vários ésteres de ácido gálico ligados à glicose e aos produtos resultantes de suas oxidações. Os taninos condensados (TCs) são compostos formados por unidades de flavano-3-óis, como catequina, epicatequina, galocatequina e epigalocatequina, organizadas em cadeias oligoméricas ou poliméricas. Possuem massas moleculares entre 1.000 e 20.000 Da e só se quebram em unidades menores quando expostos a ácidos fortes ou oxidação intensa (Tong *et al.*, 2022).

Os TCs melhoram a imunidade contra parasitas em ruminantes. Os principais parasitas incluem diferentes nematóides que vivem no abomaso, intestino delgado, grosso e pulmões. Eles causam queda na produção de carne e leite, além de custos e riscos vitais. O controle desses parasitas geralmente envolve uso de medicamentos, mas há preocupação com resíduos e a resistência. Assim, os taninos têm sido estudados por suas propriedades

antiparasitárias, por reduzirem a fecundidade e a motilidade das larvas. Além disso, os taninos aumentam a absorção de proteínas, fortalecendo o sistema imunológico, o que pode ocasionar em lesões na cutícula dos parasitas, prejudicando sua nutrição e reprodução. Estudos mostram que a suplementação com taninos reduz a contagem de ovos e danifica os parasitas, impedindo que eles se desenvolvam e se reproduzam normalmente (Vieira *et al.*, 2020).

No intestino delgado, os TCs podem potencialmente aumentar a perda endógena de proteína, decorrente de sua interação com proteínas presentes na mucosa intestinal. Este efeito pode implicar na utilização compensatória de proteína metabolizável, destinada à manutenção da integridade do epitélio gastrointestinal (Avila *et al.*, 2020). Segundo Beauchemin *et al.* (2007), a dissociação completa dos complexos tanino-proteína no abomaso pode não ocorrer, o que reduziria a digestibilidade da proteína bruta ao longo do trato digestório.

Em dietas ricas em grãos pode haver o aumento de géneros patogénicos como *Clostridium* (Liu, 2014), um patógeno que prejudica a saúde intestinal quando a função da barreira está comprometida, a ação antimicrobiana dos taninos apresenta uma estratégia direcionada e não antibiótica para reduzir esta ameaça na sua origem. Elizondo *et al.* (2010), concluíram por meio de trabalho *in vitro* com diferentes cepas de *Clostridium* sp. que misturas de taninos de quebracho e castanha não só tiveram efeito antibacteriano, mas também agiram contra diversas toxinas produzidas pelas bactérias.

Contudo, a inclusão de taninos na dieta deve ser feita de forma criteriosa, visto que concentrações elevadas podem comprometer a palatabilidade e consumo, reduzir a digestibilidade da fibra e, conseqüentemente, afetar o desempenho animal (Beauchemin *et al.*, 2020).

2.3.2. Saponinas

As saponinas (glicosídeos) são caracterizadas pela palatabilidade amarga, são encontradas em plantas terrestres, como principalmente na soja (Price *et al.*, 1987), plantas marinhas e linhagens animais, como no pepino-do-mar (Tedeschi *et al.*, 2021). São compostos pertencentes ao grupo dos

terpenoides, com estrutura predominantemente triterpenoide ou esteroidal, amplamente distribuídas em mais de 500 espécies vegetais.

O principal interesse nas saponinas se deve à sua capacidade de modular a fermentação ruminal, especialmente por sua ação defaunizante, inibindo protozoários ciliados. Elas podem interferir na digestão de proteínas no intestino ao se ligarem ao colesterol presente nas membranas celulares, provocando a ruptura dessas células. Esse efeito leva à eliminação seletiva dos protozoários no rúmen, o que contribui para uma melhor eficiência na utilização do nitrogênio e, conseqüentemente, pode promover um aumento no desempenho dos ruminantes (Kholif, 2023).

Essa ação pode favorecer a eficiência alimentar ao melhorar a síntese de proteína microbiana e reduzir a produção de metano, tanto por mecanismos indiretos, pela eliminação de protozoários que abrigam metanogênicos, quanto diretos, pela inibição de processos metabólicos relacionados à metanogênese (Tedeschi *et al*, 2021; Mcmurphy *et al*, 2014). As saponinas exercem efeitos significativos especialmente no intestino delgado. Estudos como o de McMurphy *et al* (2014) evidenciam o aumento do fluxo de proteína microbiana para o intestino, favorecendo ruminantes com alta exigência de proteína metabolizável.

A *Yucca schidigera* e a *Quillaja saponaria* representam as principais fontes de saponinas empregadas como aditivos na nutrição animal. Seus principais objetivos são aprimorar o desempenho dos animais e diminuir a produção de amônia, além do odor das fezes em animais domésticos (Demattê Filho, 2004). Embora o mecanismo exato de ação ainda não seja totalmente elucidado, sabe-se que as saponinas influenciam positivamente a microbiota intestinal, modificam o metabolismo do nitrogênio, e aumentam a permeabilidade das células da mucosa intestinal, além de potencializar a taxa de absorção no trato digestivo.

Gee *et al*. (1989) afirmaram que as saponinas alteram a absorção intestinal, o que pode trazer consequências negativas, uma vez que substâncias presentes nas dietas que normalmente não seriam absorvidas podem aumentar a sensibilização por antígenos. Saponinas também são referidas como causadoras de despolarização da membrana intestinal, o que também, altera o padrão de permeabilidade. Pela sua propriedade surfactante, possuem atividade

antiprotozoária, pois formam complexos com o colesterol das membranas celulares dos protozoários, causando a lise celular (De Souza *et al.*, 2019).

2.3.3. Óleos essenciais

Os óleos essenciais (OEs) são metabólitos secundários voláteis presentes em plantas. Do ponto de vista estrutural, classificam-se em dois principais grupos: terpenoides (monoterpenoides e sesquiterpenoides) e fenilpropanoides. Sua composição química é complexa, englobando ácidos, álcoois, aldeídos, ésteres acíclicos ou lactonas, além de compostos contendo nitrogênio e enxofre (Al-Suwaiegh *et al.*, 2020). A proporção dos constituintes ativos pode variar significativamente em função da cultivar, das condições de cultivo e do método empregado no processamento e extração.

Aditivos alimentares fitogênicos, extraídos de plantas, como o óleo essencial de orégano (contendo carvacrol e timol), apresenta propriedades antimicrobianas, antioxidantes e anti-inflamatórias, capazes de contribuir para a integridade intestinal (Wells, 2024). O óleo de orégano auxilia na integridade da mucosa e no equilíbrio microbiano (Mohammadi *et al.*, 2014).

O carvacrol (CAR) é um monoterpenoide presente nos óleos essenciais de plantas da família *Lamiaceae*, presente no orégano (Lambert *et al.*, 2001). Entre seus efeitos benéficos à saúde, destacam-se as atividades antiviral, antiparasitária, antioxidante e anti-inflamatória (Bouyahya *et al.*, 2021). Também tem sido utilizado no tratamento de distúrbios gastrointestinais. Sua ação anti-inflamatória está associada à inibição de citocinas como TNF- α e IL-6 (Alagawany *et al.*, 2015), além da neutralização de radicais livres, ajudando a prevenir danos oxidativos celulares (Asadi *et al.*, 2023).

O timol (THY) é um monoterpenoide fenólico que se apresenta como um cristal incolor com odor característico (Escobar *et al.*, 2020). O THY possui diversas propriedades farmacológicas, incluindo atividades antiespasmódica, antilisterial, antimicrobiana, anti-inflamatória e antioxidante. Estudos demonstraram que o THY é capaz de modular a patogenicidade de bactérias no trato gastrointestinal, além de favorecer o aumento da abundância de bactérias benéficas, como *Lactobacillus crispatus* e *Lactobacillus agilis*.

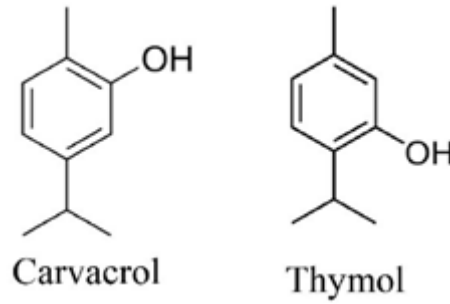


Figura 3. Estrutura química do Carvacrol e Timol.

Segundo Ma *et al.* (2023) a inclusão de OE na dieta de touros holandeses não interrompeu a homeostase do ambiente intestinal interno. Além disso, enriqueceu o número de bactérias benéficas e inibiu o crescimento de bactérias nocivas até certo ponto.

Em um estudo com ovinos, a suplementação de óleos essenciais de orégano impactou a composição e os metabólitos da microbiota intestinal, promovendo o enriquecimento de *Ruminococcus*, *Bifidobacterium* e *Enterococcus* e aumentou os níveis dos metabólitos ácido indol-3-acético e indol acetaldéido. Essas alterações na microbiota intestinal podem contribuir para o aumento da atividade da amilase, melhorando assim o desempenho do crescimento e a função da barreira intestinal (Jia *et al.*, 2022).

Como podemos observar na Figura 4, a suplementação dietética com OE de orégano reduziu o espaço entre as células epiteliais e resultou em uma tendência de reparo e espessamento. Esses resultados sugerem que a suplementação de OE melhora a morfologia colônica.

Segundo o estudo realizado por Sun *et al.* (2022) avaliando três níveis de OE de orégano em ovinos em terminação, comprimentos das vilosidades no íleo, duodeno e jejuno foram todos maiores dos tratamentos com OE em relação ao grupo controle, e as diferenças foram significativas para o duodeno e jejuno ($p < 0,05$). O que comprova os efeitos benéficos do OE na integridade do intestino de pequenos ruminantes, o que está diretamente relacionado com absorção de nutrientes, desempenho e imunidade.

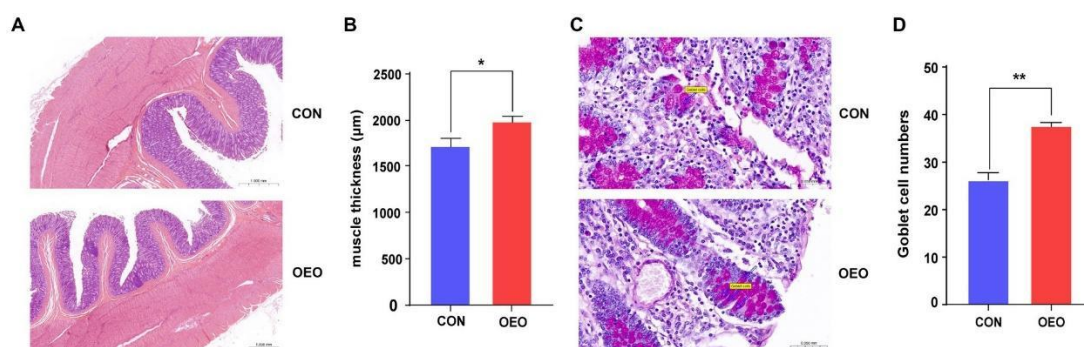


Figura 4. Efeitos do OE na histomorfologia da mucosa e número de células caliciformes. (A) Morfologia intestinal do cólon em touros. (B) Espessura muscular do cólon. (C) Distribuição de células caliciformes no epitélio colônico. Os marcadores na imagem representam células caliciformes. (D) Número de células caliciformes colônicas. $n = 6$ amostras/grupo. A significância é relatada como * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$. Fonte: Ma *et al.* (2023).

2.3.4. Prebióticos

Os prebióticos são componentes alimentares que não são digeridos pelo organismo, mas que, quando ingeridos em quantidades adequadas, promovem o crescimento ou a atividade seletiva de certos microorganismos benéficos no intestino (Uyeno *et al.*, 2015). Possuem a capacidade de modular de forma positiva a microbiota intestinal, fortalecendo o sistema imunológico, especialmente por meio da ativação de macrófagos. Os prebióticos são incorporados às rações e, por não serem digeridos pelas enzimas do trato digestivo, passam a ser fermentados, resultando na produção de compostos que favorecem o crescimento e a atividade de probióticos. Assim, contribuem indiretamente para a nutrição de bactérias benéficas e para a melhoria geral da saúde do animal (Dowarah *et al.*, 2017).

Segundo Patel e Goyal (2012), a maioria dos prebióticos promove o crescimento de bactérias benéficas aos animais. Eles funcionam como substratos para fermentação, além de se ligarem a patógenos, podendo aumentar a osmose intestinal, estimular macrófagos e a produção de AGCC, contribuindo para a modulação do sistema imunológico. Ao analisar o impacto dos prebióticos na saúde animal, é importante considerar a anatomia, fisiologia, dependência da microbiota intestinal para energia, ambiente e dieta do animal

(Gibson *et al.*, 2017).

Os prebióticos mais frequentes utilizados para melhorar a saúde são carboidratos, como oligossacarídeos, ou fibras alimentares com baixa digestibilidade (Uyeno *et al.*, 2015). A levedura, usada na alimentação animal há décadas por seu teor proteico, vitaminas B e seu poder palatável, possui na parede celular os compostos β -glucanos e mananoligossacarídeos (MOS), cujas concentrações variam conforme a cepa, como *Saccharomyces cerevisiae* (Spring *et al.*, 2000; Novak e Vetvicka, 2008).

Os β -glucanos presentes nas leveduras diferem estruturalmente dos encontrados em cereais: na levedura, predominam as ligações β -1,3 com ramificações β -1,6, que possuem elevada capacidade imunomoduladora — ao contrário dos β -1,4-glucanos dos cereais, que têm ação limitada (Novak e Vetvicka, 2008). Esse complexo de manano-glucano também confere estabilidade e baixa solubilidade ao MOS, fundamental para seu desempenho no intestino animal.

Os Mananoligossacarídeos (MOS) são açúcares manose complexos que bloqueiam a colonização de patógenos no trato digestivo (Uyeno *et al.*, 2015). O MOS são fibras derivadas da parede celular das leveduras que funcionam como prebióticos, pois não são degradadas pelas enzimas digestivas do intestino, mas são fermentadas de forma seletiva pelas bactérias intestinais. O MOS atua principalmente como um bloqueador de patógenos: ele se liga a bactérias como *Salmonella* e *Escherichia coli*, impedindo sua fixação nas células intestinais e reduzindo a infecção (Spring *et al.*, 2000). Isso ocorre pois ele ocupa os locais onde essas bactérias prejudiciais normalmente se prendem, além de criar um ambiente que dificulta o crescimento dessas bactérias, ajudando a controlar sua multiplicação. Embora frequentemente classificado como prebiótico, o MOS pode levar a confusões quanto à definição clássica de prebiótico, que envolve estímulo seletivo de bactérias benéficas.

2.3.5. Probióticos

Os probióticos podem ser descritos como microrganismos vivos, geralmente bactérias das cepas *Bifidobacterium* e *Lactobacillus*, que quando

administradas em quantidades corretas, conferem benefícios principalmente a nível intestinal (Latif *et al.*, 2023). De acordo com Fusco *et al.* (2023), os probióticos contribuem para a integridade da barreira intestinal ao impedir a adesão de bactérias patogênicas às células epiteliais da mucosa, além de regularem a resposta imune do hospedeiro. Seus benefícios incluem o equilíbrio da microbiota intestinal e o aumento da absorção e disponibilidade de macro e micronutrientes.

Probióticos dificultam a colonização intestinal por patógenos ao competir com eles por nutrientes e por sítios de ligação nos receptores epiteliais, reduzindo sua viabilidade no trato gastrointestinal (Plaza-Diaz *et al.*, 2019). Além disso, esses microrganismos benéficos atuam na inibição direta de patógenos por meio da produção de compostos antimicrobianos, como ácidos graxos de cadeia curta (AGCC), ácidos orgânicos, peróxido de hidrogênio e bacteriocinas (Ahire *et al.*, 2021; Fantinato *et al.*, 2019; Latif *et al.*, 2023), contribuindo para o controle microbiano no ambiente intestinal.

No sistema imunológico, modulam a maturação e o funcionamento de células dendríticas, o que leva à ativação das células T e contribui para a manutenção da homeostase imune. Além disso, há evidências de que os probióticos influenciam o eixo intestino-cérebro, participando da regulação de neurotransmissores como serotonina, dopamina e ácido gama-aminobutírico (GABA), com possíveis efeitos sobre o comportamento e o bem-estar do hospedeiro (Latif *et al.*, 2023).

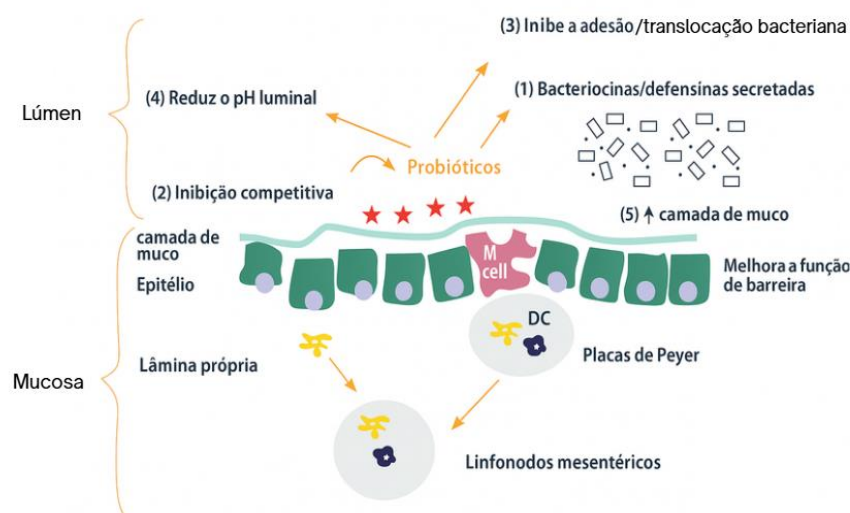


Figura 5. Mecanismos de ação dos probióticos. (Fonte: NG *et al.*, 2009).

Segundo Chida *et al.* (2021) a dieta com alta energia reduziu a quantidade de linfócitos em vacas leiteiras e aumentou a produção de citocinas inflamatórias (IL-1 β e IL-2) quando as células do sangue foram estimuladas com lipopolissacarídeos (LPS). Posteriormente, com a suplementação com o probiótico (*Lactobacillus plantarum*) houve aumento novamente dos linfócitos e normalizou os níveis de IL-1 β e IL-2, semelhantes aos da dieta de baixa energia. Isso mostra que a alimentação rica em energia pode estimular a inflamação, mas o probiótico ajuda a controlar essa resposta, podendo ser usado para regular a inflamação em vacas leiteiras de alta produção.

2.3.6. Adsorventes de toxinas

Os adsorventes podem ser classificados em dois tipos: inorgânicos e orgânicos, de acordo com sua composição química (Vila-Donat *et al.*, 2018). Os inorgânicos são suplementos de baixo custo e sem valor nutricional relevante, mas oferecem proteção limitada contra micotoxinas. Entre eles, destacam-se as argilas e os tectossilicatos (Santurio, 2007). Nessa categoria também estão incluídos os aluminossilicatos (como as bentonitas), as sílicas e o carvão ativado (Piva *et al.*, 1993).

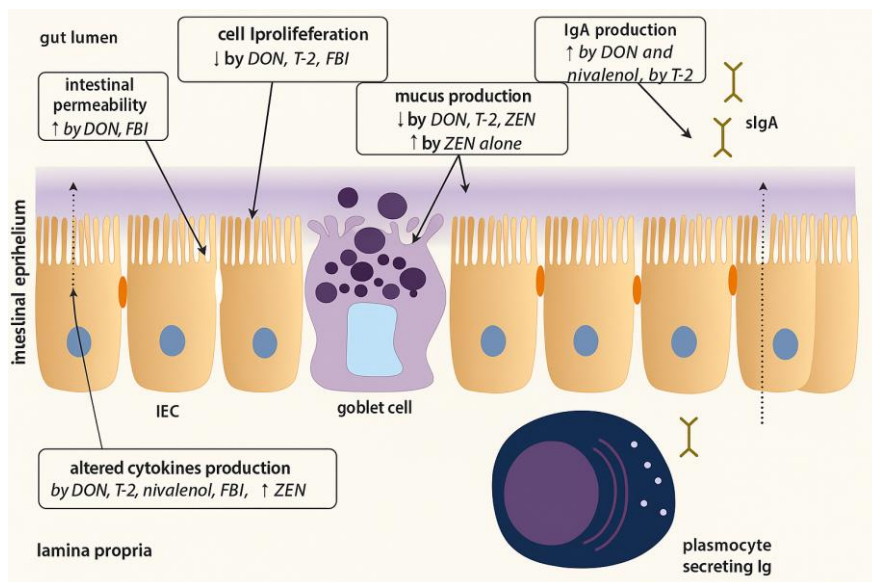


Figura 6. Efeito de toxinas (DON, NIV, FB1, toxina T-2 e ZEN) no epitélio intestinal. Eles alteram diferentes mecanismos de defesa intestinal, incluindo a integridade epitelial, a proliferação celular, a mucosa, a imunoglobulina (Ig) e a produção de citocinas. (Fonte: Antonissen *et al.*, 2014).

Para adsorção, usam-se compostos capazes de se ligar às micotoxinas presentes nas rações contaminadas, sem se separar no trato gastrointestinal dos animais. Isso faz com que as micotoxinas fiquem presas ao adsorvente, reduzindo sua absorção e, depois, sejam eliminadas pelas fezes. A ligação entre micotoxinas e adsorventes pode acontecer de várias formas, como interações hidrofóbicas, pontes de hidrogênio e interações eletrostáticas. É essencial que essa ligação seja estável durante todo o processo digestivo, para evitar que a micotoxina se desprenda. A eficiência da adsorção depende das características do adsorvente, como carga elétrica, tamanho dos poros e área de superfície, e das micotoxinas, como polaridade, solubilidade e forma da molécula (Cabral, 2019).

Já os β -glucanos, já citados nesta revisão, também são classificados como adsorventes orgânicos, as quais possuem capacidade de adsorver várias micotoxinas. Nesta categoria, as glucanas possuem significativo poder ligante às aflatoxinas e zearalenona por meio de pontes de hidrogênio entre a micotoxina e as glucanas (Yiannikouris *et al.* 2002).

2.3.7. Butirato de sódio

O butirato de sódio desempenha um papel essencial no desenvolvimento do rúmen, além de contribuir para o estabelecimento e a manutenção do epitélio ruminal e intestinal (Górka *et al.*, 2019). Segundo Mentschel *et al.* (2001) esses efeitos estão relacionados à sua capacidade de estimular a atividade mitótica das células e de reduzir a taxa de apoptose (morte celular).

O ácido butírico atua diretamente sobre o pH do meio em que se encontra. O revestimento que resiste à acidez gástrica limita sua ação no estômago, permitindo que exerça efeito mais intenso no intestino (Ribeiro *et al.*, 2012). No ambiente intestinal, o ácido butírico reduz o pH, dificultando a adesão de bactérias patogênicas ao epitélio e, conseqüentemente, favorecendo uma mucosa menos danificada pela multiplicação bacteriana e mais eficiente na absorção de nutrientes. O ácido butírico pode ser adicionado à dieta de ruminantes de diversas formas, incluindo sais de butirato, como butirato de cálcio, sódio, potássio e magnésio, bem como na forma de butirinas.

Segundo o estudo de Zhong *et al.* (2023) em bezerros, o butirato de sódio reduziu a inflamação do rúmen e jejuno ao regular negativamente as vias IL-17 e NF- κ B, além de modular a microbiota e estimular o metabolismo de carboidratos. De modo geral, promoveu o desenvolvimento gastrointestinal, fortalecendo a imunidade e a atividade microbiana ruminal.

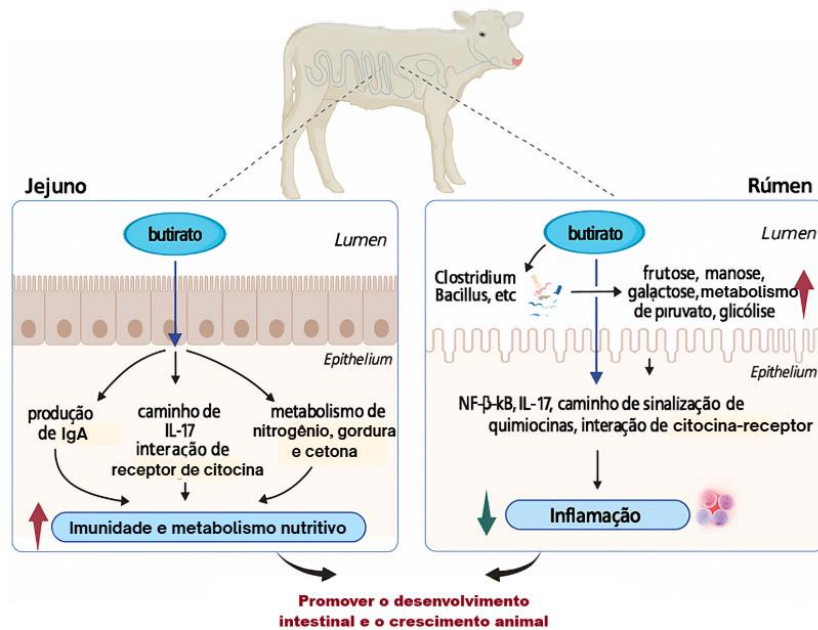


Figura 7. Diagrama geral do efeito do butirato no rúmen, no microbioma do rúmen e no jejuno. Adaptado de Zhong *et al.* (2023).

Segundo Moreira *et al.* (2016) avaliando a inclusão de butirato em dietas de bovinos nelore machos inteiros em confinamento, concluíram que a suplementação com 10 g de butirato de cálcio resultou na maior altura de vilosidade no duodeno, o que sugere uma possível melhoria da superfície de absorção no intestino delgado.

3. Considerações Finais

A integridade intestinal dos ruminantes representa um importante pilar para o desempenho produtivo e bem-estar animal, estando diretamente relacionadas à eficiência digestiva, resposta imune e resistência a patógenos. Diversos aditivos nutricionais, como prebióticos, probióticos, taninos, óleos

essenciais e adsorventes, possuem a ação de modular favoravelmente a microbiota e preservam a integridade da mucosa intestinal. Esses compostos atuam tanto no equilíbrio microbiano quanto na manutenção da morfologia intestinal, favorecendo maior absorção de nutrientes e redução de processos inflamatórios. Evidências científicas reforçam que a escolha estratégica e combinada desses aditivos pode potencializar seus efeitos benéficos. Assim, o uso racional e embasado desses recursos surge como alternativa promissora para melhorar a saúde intestinal e, conseqüentemente, a eficiência nutricional em sistemas de ruminantes.

4. Referências bibliográficas

- AHIRE, J.; JAKKAMSETTY, C.; KASHIKAR, M. S.; LAKSHMI, S. G.; MADEMPUDI, R. S. In Vitro Evaluation of Probiotic Properties of *Lactobacillus plantarum* UBLP40 Isolated from Traditional Indigenous Fermented Food. **Probiotics Antimicrob Proteins**, v. 13, p. 1413–1424, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12602-021-09775-7>.
- ALAGAWANY, M.; EL-HACK, M. E. A.; FARAG, M. R.; TIWARI, R.; DHAMA, K. Biological Effects and Modes of Action of Carvacrol in Animal and Poultry Production and Health - A Review. **Advances in Animal and Veterinary Sciences**, v. 3, n. 2 Suplemento, p. 73-84, 2015. <https://doi.org/10.14737/journal.aavs/2015/3.2s.73.84>.
- AL-SUWAIEGH, S. B. *et al.* Effect of an essential oils mixture on the performance of dairy cows during treatment and post-treatment periods. **Sustainability**, v. 12, n. 21, p. 9123, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12219123>.
- ANTONISSEN, G. *et al.* The impact of *Fusarium* mycotoxins on human and animal host susceptibility to infectious diseases. **Toxins**, v. 6, n. 2, p. 430-452, 2014. <https://doi.org/10.3390/toxins6020430>.
- ASADI, A. *et al.* Antibacterial and anti-biofilm properties of carvacrol alone and in combination with cefixime against *Escherichia coli*. **Journal of Clinical Laboratory Analysis**, v. 23, 10 p., 2023. <https://doi.org/10.1186/s12866-023-02797-x>.
- AVILA, A. S. *et al.* Black Wattle (*Acacia mearnsii*) condensed tannins as feed additives to lactating dairy cows. **Animals**, v. 10, n. 4, p. 662, 2020. <https://doi.org/10.3390/ani10040662>.
- BEAUCHEMIN, K. A. *et al.* Use of condensed tannin extract from quebracho trees to reduce methane emissions from cattle. **Journal of Animal Science**, v. 85, n. 8, p. 1990-1996, 2007. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-686>.

- BEAUCHEMIN, K. A. *et al.* Use of condensed tannin extract from quebracho trees to reduce methane emissions from cattle. **Animal Feed Science and Technology**, v. 166–167, p. 402–411, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.072>.
- BOUYAHYA, A. *et al.* Health benefits and pharmacological properties of carvone. **Biomolecules**, v. 11, n. 12, p. 1803, 2021. <https://doi.org/10.3390/biom11121803>.
- BRAVO, D. M.; WALL, E. H. The rumen and beyond: Nutritional physiology of the modern dairy cow. **Journal of Dairy Science**, v. 99, n. 6, p. 4939-4940, 2016. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10191>.
- CABRAL, S. M. Adsorção multi-micotoxinas: revisão e estudo de carvões ativados. 2019. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.
- CHIDA, S. *et al.* Changes in immune system and intestinal bacteria of cows during the transition period. **Veterinary and Animal Science**, v. 14, p. 100222, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2021.100222>.
- DE SOUZA, C. G. *et al.* Fatores antinutricionais de importância na nutrição animal: Composição e função dos compostos secundários. **Pubvet**, v. 13, p. 166, 2019. <https://doi.org/10.31533/pubvet.v13n5a327.1-19>.
- DEMATTE FILHO, L. C. Aditivos em dietas para frangos de corte criados em sistema alternativo. 2004. 95 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- DOWARAH, R. *et al.* Effect of swine-based probiotic on performance, diarrhea scores, intestinal microbiota and gut health of grower-finisher crossbred pigs. **Livestock Science**, v. 195, p. 74-79, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2016.11.006>.
- ELIZONDO, A. M. *et al.* Effect of tannins on the in vitro growth of *Clostridium perfringens*. **Veterinary Microbiology**, v. 145, n. 3-4, p. 308-314, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2010.04.003>.
- ESCOBAR, A. *et al.* Bioactivity of thymol: a review with focus on practical applications. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 13, p. 9243–9269, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.11.009>.
- FANTINATO, V.; CAMARGO, H. R.; SOUSA, A. L. O. P. Estudo de probióticos com *Streptococcus salivarius* e sua capacidade de produzir bacteriocinas e adesão às células KB. **Rev Odontol. UNESP**, v. 48, p. 1–9, 2019. <https://doi.org/10.1590/1807-2577.02919>.
- FUSCO, A. *et al.* In Vitro Evaluation of the Most Active Probiotic Strains Able to Improve the Intestinal Barrier Functions and to Prevent Inflammatory Diseases of the Gastrointestinal System. **Biomedicine**, v. 11, 2023. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11030865>.

- GEE, J. M. *et al.* Effects of saponins and glycoalkaloids on the transmucosal passage of β -lactoglobulin across the proximal small intestine. **Toxicology**, v. 117, n. 2-3, p. 219-228, 1989. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(96\)03574-3](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(96)03574-3).
- GIBSON, G. *et al.* Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. **Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology**, v. 14, p. 491–502, 2017. <https://doi.org/10.1038/nrgastro.2017.75>.
- GÓRKA, P. *et al.* Effect of exogenous butyrate on the gastrointestinal tract of sheep. I. Structure and function of the rumen, omasum and abomasum. **Journal of Animal Science**, v. 98, n. 1, 2019. <https://doi.org/10.1093/jas/skz032>.
- GRESSLEY, T. F.; HALL, M. B.; ARMENTANO, L. E. Ruminant nutrition symposium: productivity, digestion, and health responses to hindgut acidosis in ruminants. **Journal of Animal Science**, v. 89, n. 4, p. 1120-1130, 2011. <https://doi.org/10.2527/jas.2010-3460>.
- GROSCWITZ, K. R.; HOGAN, S. P. Intestinal barrier function: molecular regulation and disease pathogenesis. **Journal of Allergy and Clinical Immunology**, v. 124, n. 1, p. 3-20, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2009.05.038>.
- JIA, Li *et al.* Oregano essential oils mediated intestinal microbiota and metabolites and improved growth performance and intestinal barrier function in sheep. **Frontiers in Immunology**, v. 13, p. 908015, 2022. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.908015>.
- KARLSSON, C. L. J. *et al.* Effects on weight gain and gut microbiota in rats given bacterial supplements and a high-energy-dense diet from fetal life through to 6 months of age. **British Journal of Nutrition**, v. 106, p. 887–895, 2011. <https://doi.org/10.1017/S0007114511001036>.
- KHOLIF, A. E. A review of effect of saponins on ruminal fermentation, health and performance of ruminants. **Veterinary Sciences**, v. 10, p. 1-19, 2023. <https://doi.org/10.3390/vetsci10070450>.
- LAMBERT, R. J. W. *et al.* A study of the minimum inhibitory concentration and mode of action of oregano essential oil, thymol and carvacrol. **Journal of Applied Microbiology**, v. 91, p. 453-462, 2001. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2001.01428.x>.
- LATIF, A. *et al.* Probiotics: mechanism of action, health benefits and their application in food industries. **Frontiers in Microbiology**, v. 17, 15 p., 2023. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1216674>.
- LIU, J. *et al.* High-grain feeding alters caecal bacterial microbiota composition and fermentation and results in caecal mucosal injury in goats. **British Journal of Nutrition**, v. 112, n. 3, p. 416-427, 2014.

<https://doi.org/10.1017/S0007114514000993>.

- LIU, Lily *et al.* Research progress on the regulation of production traits by gastrointestinal microbiota in dairy cows. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 10, p. 1206346, 2023. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1206346>.
- MA, Yue *et al.* Oregano essential oil modulates colonic homeostasis and intestinal barrier function in fattening bulls. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, p. 1293160, 2023. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1293160>.
- MCMURPHY, C. P. *et al.* Effects of including saponins (Micro-Aid®) on intake, rumen fermentation and digestibility in steers fed low-quality prairie hay. **Animal Feed Science and Technology**, v. 190, p. 47–58, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.01.007>.
- MENTSCHER, J. *et al.* Butyric acid stimulates rumen mucosa development in the calf mainly by a reduction of apoptosis. **Archives of Animal Nutrition**, v. 55, p. 85-102, 2001. <https://doi.org/10.1080/17450390109386185>.
- MOHAMMADI, Z.; GHAZANFARI, S.; MORADI, M. A. Effect of supplementing clove essential oil to the diet on microflora population, intestinal morphology, blood parameters and performance of broilers. **European Poultry Science**, v. 78, 2014. <https://doi.org/10.1399/eps.2014.51>.
- MOREIRA, T. S. O. *et al.* Duodenal histology and carcass quality of feedlot cattle supplemented with calcium butyrate and *Bacillus subtilis*. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 38, p. 61-67, 2016. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v38i1.27432>.
- NG, S. C. *et al.* Mechanisms of action of probiotics: recent advances. **Inflammatory Bowel Diseases**, v. 15, n. 2, p. 300-310, 2009. <https://doi.org/10.1002/ibd.20602>.
- NOVAK, M.; VETVICKA, V. β -glucans, history, and the present: immunomodulatory aspects and mechanisms of action. **Journal of Immunotoxicology**, v. 5, n. 1, p. 47–57, 2008. <https://doi.org/10.1080/15476910802019045>.
- PATEL, S.; GOYAL, A. Current trends and future perspectives of prebiotic research: a review. **3 Biotech**, v. 2, p. 115–125, 2012. <https://doi.org/10.1007/s13205-012-0044-x>.
- PIVA, G.; BELLADONA, S.; FUSCONI, G. Effects of yeast on dairy cow performance, ruminal fermentation, blood components, and milk manufacturing properties. **Journal of Dairy Sci.**, v. 76, p. 2717-2722, 1993. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77608-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77608-0).
- PLAIZIER, J. C. *et al.* Subacute ruminal acidosis (SARA), endotoxins and health consequences. **Animal Feed Science and Technology**, v. 172, n. 1-2, p. 9-21, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.12.004>.
- PLAZA-DIAZ, J. *et al.* Mecanismos de ação dos probióticos. **Advances in**

- Nutrition, v. 10, 2019. <https://doi.org/10.1093/advances/nmy063>.
- PRICE, K. R.; JOHNSON, I. T.; FENWICK, G. R. The chemistry and biological significance of saponins in foods and feeding stuffs. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 26, p. 27–135, 1987. <https://doi.org/10.1080/10408398709527461>.
- RIBEIRO, J. *et al.* Sodium butyrate in growing and fattening diets for early-weaned rabbits. *World Rabbit Science*, v. 20, n. 4, p. 199-207, 2012. <https://doi.org/10.4995/wrs.2012.1233>.
- SANTURIO, J. M. Micotoxinas e micotoxicoses nos suínos. *Acta Scientiae Veterinariae*, v. 35, p. 51-58, 2007.
- SPRING, P. *et al.* Effects of dietary mannanoligosaccharides on cecal parameters and concentrations of enteric bacteria in the ceca of Salmonella-challenged broiler chickens. *Poultry Science*, v. 79, n. 2, p. 205-211, 2000. <https://doi.org/10.1093/ps/79.2.205>.
- SUN, J. *et al.* Influence of increasing levels of oregano essential oil on intestinal morphology, intestinal flora and performance of Sewa sheep. *Italian Journal of Animal Science*, v. 21, n. 1, p. 463-472, 2022. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2022.2048208>.
- TEDESCHI, L. O. *et al.* Nutritional aspects of ecologically relevant phytochemicals in ruminant production. *Frontiers in Veterinary Science*, v. 8, p. 1-24, 2021. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.628445>.
- TONG, Z. *et al.* Biological function of plant tannin and its application in animal health. *Frontiers in Veterinary Science*, v. 8, 2022. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.803657>.
- UYENO, Y.; SHIGEMORI, S.; SHIMOSATO, T. Effect of probiotics/prebiotics on cattle health and productivity. *Microbes and Environments*, v. 30, n. 2, p. 126-132, 2015. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME14176>.
- VIEIRA, L. V. *et al.* Utilização de taninos como aditivo nutricional na dieta de ruminantes. *Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia da UNIPAR*, v. 23, n. 1, 2020. <https://doi.org/10.25110/arqvet.v23i1cont.2020.8040>.
- VILA-DONAT, P. *et al.* A review of the mycotoxin adsorbing agents, with an emphasis on their multi-binding capacity, for animal feed decontamination. *Food and Chemical Toxicology*, v. 114, p. 246–259, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.02.044>.
- VLASOVA, A. N.; SAIF, L. J. Bovine immunology: implications for dairy cattle. *Frontiers in Immunology*, v. 12, p. 643206, 2021. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.643206>.
- WELLS, C. W. Effects of essential oils on economically important characteristics of ruminant species: a comprehensive review. *Animal Nutrition*, v. 16, p. 1-10, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.05.017>.

- YIANNIKOURIS, A.; JOUANY, J. P. Mycotoxins in feeds and their fate in animals: a review. **Animal Research**, v. 51, p. 81-99, 2002. <https://doi.org/10.1051/animres:2002012>.
- YUE, S. *et al.* Impact of feeding enzymatically hydrolyzed protein on rumen microbial population, blood metabolites and performance parameters of lactating dairy cows. **Pakistan Veterinary Journal**, v. 43, 2023. <https://doi.org/10.29261/pakvetj/2023.081>.
- ZHONG, H. *et al.* Sodium butyrate promotes gastrointestinal development of preweaning bull calves via inhibiting inflammation, balancing nutrient metabolism, and optimizing microbial community functions. **Animal Nutrition**, v. 14, p. 88-100, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.04.004>.
- ZHU, H. *et al.* Analysis of cow-calf microbiome transfer routes and microbiome diversity in the newborn Holstein dairy calf hindgut. **Frontiers in Nutrition**, v. 8, p. 736270, 2021. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.736270>.

Autores

Matheus Lehnhart de Moraes, Camila Ten Kathen Jung, Gilberto Vilmar Kozloski

Departamento de Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

CAPÍTULO 3

Pais desconhecidos em pedigrees de animais domésticos: abordagem e metodologias aplicadas

Daniele Alves, Saymon Rocha, Thais Machado, Jeriel Dias, Heloísa Furlani, Kettlen Neves, Sirlene Lazaro, Hinayah Rojas de Oliveira, Thaise Pinto de Melo

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-39-8.c3>

Resumo

Informações perdidas no pedigree podem reduzir as acurácias de avaliações genéticas em animais domésticos. Algumas metodologias que incluem informação genômica têm auxiliado a melhorar as acurácias dos valores genéticos nestas situações. Métodos como metafundadores (MFs), grupos de pais desconhecidos (UPGs) e pedigrees truncados têm sido combinados à informação genômica, com resultados positivos em algumas espécies de animais domésticos como solução a problemática dos pais desconhecidos. Este capítulo tem como objetivo apresentar as bases teóricas e exemplos de aplicações práticas utilizando as metodologias dos UPGs, metafundadores e pedigrees truncados, incluindo um tutorial passo a passo de como realizar estas metodologias nos programas da família BLUPF90: <https://github.com/danielealves-sys/TutorialUpgMfTrunc>.

Palavras chave: avaliação genética, BLUPF90, grupos de pais desconhecidos, metafundadores, pedigree truncado.

1. Introdução

A avaliação genética tem sido primordial nos programas de melhoramento genético, evoluindo constantemente com o acesso a novas tecnologias. Inicialmente, as avaliações genéticas eram baseadas somente em dados fenotípicos e de pedigree, o que apesar de eficazes, apresentavam algumas limitações, principalmente quando confrontadas com dados genealógicos incompletos ou erros de coleta de dados (Pimentel *et al.*, 2024).

A inconsistência de informações genealógicas, como em pedigrees incompletos, pode comprometer a construção das matrizes **A** e **H**, e, conseqüentemente, a precisão dos valores genéticos dos animais (Masuda *et al.*, 2022). Atualmente, diferentes estratégias têm sido utilizadas para contornar essa limitação, como o uso de metafundadores (MFs). Segundo Christensen (2012), o conceito de MFs propõe a inclusão de uma matriz de covariância entre fundadores, possibilitando que eles compartilhem a ancestralidade parcial, o que difere da suposição tradicional onde os fundadores não são relacionados.

Além disso, outra solução amplamente utilizada é uso de *Unknown Parent Groups* (UPGs) proposta por Quaas (1988), a qual modela efeitos genéticos médios para animais com registros parentais desconhecidos, utilizando como base o ano de nascimento, sexo ou origem geográfica. O uso de pedigrees truncados também pode ser utilizado como uma estratégia para lidar com a problemática de pedigrees perdidos, o qual consiste em remover animais de gerações mais antigas.

Nesse sentido, Lourenco *et al.* (2014) afirmam que ao utilizar fenótipos dos últimos dez anos ou das últimas três gerações, podemos reduzir o viés de seleção acumulado ao longo do tempo nos dados históricos, tornando as predições genéticas para os animais candidatos a seleção mais acuradas e menos influenciadas por informações ancestrais com erros ou ausentes (Bussiman *et al.*, 2023). Entender a teoria, as aplicações e os desafios associados ao uso de pedigree incompleto é um importante passo para melhorar os modelos de avaliação genética em animais domésticos.

2. Grupos de pais desconhecidos (UPGs)

Os UPGs podem ser definidos como "*grupos de pais fantasmas*" ou uns ancestrais representativos. Quando o pai ou a mãe de um animal é desconhecido, ao em vez de manter a informação perdida assumindo que ele vem de uma base genética antiga com valor genético zero, este indivíduo é incluído em um grupo. Esse grupo representa a média genética esperado para aquele grupo de pais e/ou mães desconhecidos.

Modelos que ignoram os UPGs tendem a subestimar severamente o progresso genético real da população, comprometendo o monitoramento do programa e as projeções econômicas (Meyer, 2021). A metodologia não apenas aumenta a acurácia das previsões, mas também reduz drasticamente o viés sistemático, especialmente para animais jovens (Bradford *et al.*, 2019).

A principal consequência da inclusão das UPGs é a correção da tendência genética nas estimativas. O efeito dos UPGs sobre os valores genéticos é estatisticamente e quantitativamente relevante (Misztal *et al.*, 2013), sobretudo em populações com animais jovens com pedigrees incompletos. Segundo Masuda *et al.* (2022), a ausência de pedigree pode introduzir vies nas previsões genômicas pelo ssGBLUP. A inclusão de UPG corrige parte dessas distorções, ajustando diferenças genéticas médias entre animais sem ascendência informada e reduzindo tendências genéticas. No entanto, os autores destacam que, em bases de dados pequenas ou incompletas, o modelo pode subestimar os efeitos dos UPG.

Na prática, o pedigree passa a apresentar uma codificação para o UPG que fica no lugar do Pai desconhecido. Esse UPG se torna um ponto de partida na rede de parentesco, conectando os animais com pais desconhecidos através de uma média estimada para os UPGs. A Figura 1 ilustra tais relações.

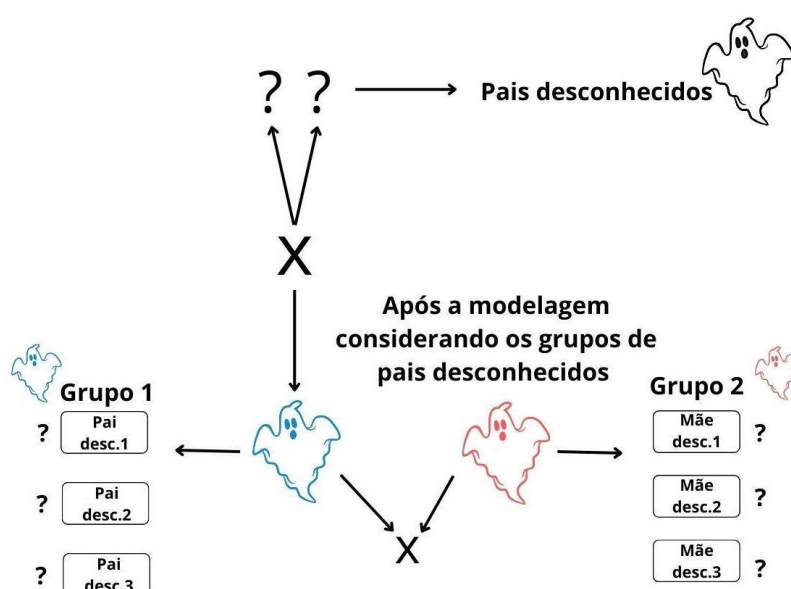


Figura 1. Representação esquemática dos UPGs, que substituem os pais ausentes no pedigree e conectam os animais por meio de médias genéticas estimadas para cada grupo.

A construção dos UPG é uma das primeiras etapas da análise e deve levar em conta possíveis diferenças entre os indivíduos da população. O objetivo nesta etapa é construir UPGs mais homogêneos possíveis. Ao avaliar uma população multirracial de bovinos de corte, por exemplo, os UPGs podem ser construídos combinando as informações do sexo (no caso de características avaliadas em ambos os sexos), ano/geração de nascimento e composição racial, como segue:

a) UPG1: MACHO_BRAFORD_2000-2010: Representa o valor genético médio de todos os pais desconhecidos da raça Braford, nascidos entre 2000 e 2010.

b) UPG2: FEMEA_NELORE_2011-2015: Representa o valor genético médio de todas as mães desconhecidas da raça Nelore, nascidas entre 2011 e 2015.

A inclusão de UPGs modifica o modelo animal clássico, conforme descrito por Legarra *et al.* (2014). Assim, o modelo ajustado se torna:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{ZQg} + \mathbf{Za}^* + \mathbf{e}$$

Neste modelo, $\mathbf{y}$ é o vetor de observações, $\boldsymbol{\beta}$ é o vetor de efeitos fixos, $\mathbf{X}$ é a matriz de incidência dos efeitos fixos que relaciona as observações no vetor $\mathbf{y}$ aos seus respectivos níveis de efeitos fixos no vetor $\boldsymbol{\beta}$, $\mathbf{Z}$ é a matriz de incidência dos efeitos aleatórios, relaciona as observações no vetor $\mathbf{y}$ aos animais correspondentes no vetor $\mathbf{a}$; e $\mathbf{e}$ é o vetor de erros ou resíduos aleatórios. Assume-se que $\mathbf{e}$ segue uma distribuição normal com média zero. O valor genético dos animais ($\mathbf{a}_i$) é decomposto em efeito médio do grupo ao qual seu pai desconhecido pertence ($\mathbf{g}_j$) e o desvio do indivíduo em relação a essa média ($\mathbf{a}_i^*$).

Para solucionar as equações de modelo misto, a inversa da matriz de parentesco é modificada para acomodar os UPGs, tratando-os como "animais fantasmas" sem variância de segregação Mendeliana, conforme a transformação de Quaas-Pollak (Quaas, 1988). A inversa da matriz de covariâncias para os efeitos genéticos e de grupo ($\mathbf{A}^{*-1}$) é então construída da seguinte forma:

$$\mathbf{A}^{*-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{-1} & -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{Q} \\ -\mathbf{Q}'\mathbf{A}^{-1} & \mathbf{Q}'\mathbf{A}^{-1}\mathbf{Q} \end{bmatrix}$$

Nesta matriz, $\mathbf{A}^{*-1}$ é a inversa da matriz de parentesco por pedigree de todos os animais, e $\mathbf{Q}$ é a matriz de incidência que aloca a fração de cada ancestral desconhecido de um indivíduo ao seu respectivo UPG. Esta estrutura permite que o modelo ajuste corretamente o valor genético do animal, considerando a média do seu grupo de origem.

A inclusão da informação genômica nas avaliações genéticas têm o potencial de melhorar as estimativas dos efeitos dos UPGs. Ao incluir a informação genômica junto aos UPGs no método Single-Step GBLUP (ssGBLUP) por exemplo, a matriz de parentesco baseada no pedigree ($\mathbf{A}$) é combinada com a matriz de parentesco genômico ($\mathbf{G}$), que é calculada a partir dos efeitos marcadores (SNPs) (Vanraden, 2008). O resultado é uma matriz unificada, a matriz $\mathbf{H}$, cuja inversa ($\mathbf{H}^{-1}$) substitui a $\mathbf{A}^{-1}$ nas equações do modelo misto. A forma geral da $\mathbf{H}^{-1}$ é dada por (Aguilar *et al.*, 2010):

$$\mathbf{H}^{-1} = \mathbf{A}^{-1} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{G}^{-1} - \mathbf{A}_{22}^{-1} \end{bmatrix}$$

Onde $\mathbf{A}_{22}$ é um subconjunto da matriz $\mathbf{A}$, considerando apenas os animais genotipados. Ao considerar os UPGs nas análises, a informação dos mesmos precisa ser incluída em ambas as matrizes, do pedigree tradicional ($\mathbf{A}^{-1}$) e do pedigree apenas dos animais genotipados ($\mathbf{A}_{22}^{-1}$), para garantir a compatibilidade entre as bases genética e genômica. A abordagem mais comum e robusta, conhecida como *altered QP model* (Masuda *et al.*, 2022) inclui o UPG na matriz $\mathbf{A}$ e traz a seguinte modificação para a $\mathbf{H}^{-1}$:

$$\mathbf{H}_{UPG}^{-1} = \mathbf{A}_{UPG}^{-1} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{G}^{-1} - \mathbf{A}_{22,UPG}^{-1} \end{bmatrix}$$

Nesta equação, $\mathbf{A}_{22}^{-1}$ e $\mathbf{A}_{22,UPG}^{-1}$ são as inversas das matrizes de parentesco ajustadas para os UPGs. Alternativamente, outra abordagem (ssGBLUP/H_UPG) consiste em incluir os UPGs em todos os elementos da matriz $\mathbf{H}$. A sua inversa ($\mathbf{H}^{-1}$) é construída da seguinte forma, conforme detalhado por Masuda *et al.* (2022):

$$\mathbf{H}_{QP}^{-1} = \mathbf{A}_{UPG}^{-1} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{G}^{-1} - \mathbf{A}_{22}^{-1} & -(\mathbf{G}^{-1} - \mathbf{A}_{22}^{-1})\mathbf{Q}_2 \\ \mathbf{0} & -\mathbf{Q}_2'(\mathbf{G}^{-1} - \mathbf{A}_{22}^{-1}) & \mathbf{Q}_2'(\mathbf{G}^{-1} - \mathbf{A}_{22}^{-1})\mathbf{Q}_2 \end{bmatrix}$$

Onde: $\mathbf{A}_{22}^{-1}$ é a inversa da matriz de parentesco por pedigree já ajustada para os UPGs; $\mathbf{G}^{-1}$ e $\mathbf{A}_{22}^{-1}$ são as inversas das matrizes de parentesco genômico e por pedigree (apenas para animais genotipados), respectivamente; $\mathbf{Q}_2$ é a submatriz de alocação que relaciona os animais genotipados aos seus respectivos UPGs. A principal diferença desta matriz para a anterior é a inclusão dos termos $-(\mathbf{G}^{-1} - \mathbf{A}_{22}^{-1})\mathbf{Q}_2$ e $\mathbf{Q}_2'(\mathbf{G}^{-1} - \mathbf{A}_{22}^{-1})\mathbf{Q}_2$, que explicitamente modelam a covariância entre os valores genéticos dos animais genotipados e os efeitos dos UPGs.

3. Uso de metafundadores em avaliação genética com pais desconhecidos

Tradicionalmente, a utilização dos UPGs tem sido uma das principais estratégias adotadas para representar ancestrais desconhecidos em pedigrees de animais domésticos. Entretanto, sua principal limitação reside na suposição de independência entre os grupos formados, desconsiderando possíveis relações de parentesco. Visando superar essa restrição, podemos aplicar a metodologia dos metafundadores (MF), que expande a teoria dos UPG ao incorporar informações de relacionamento e endogamia entre populações fundadoras, configurando-se como uma alternativa promissora para aprimorar a compatibilidade entre as matrizes de parentesco ($\mathbf{A}$) e matriz genômica ($\mathbf{G}$) (Masuda *et al.*, 2022).

A Figura 2 ilustra, de forma esquemática, o conceito de metafundador e como os mesmos são considerados nos pedigrees. No diagrama, o “Metafundador” representa uma população ancestral hipotética, conectada aos indivíduos da população base (animais 2 a 6) por linhas pontilhadas que caracterizam um pseudo-pedigree, isto é, uma relação genética estimada a partir de frequências alélicas, sem registro genealógico real. A partir dessa base, o fluxo de descendência segue pelas gerações seguintes (animais 7 a 13), evidenciando como a inclusão do metafundador permite modelar a variabilidade genética original e corrigir a falta de informações completas do pedigree. Essa representação facilita compreender como os MFs incorporam a estrutura da população fundadora na matriz de parentesco, melhorando as acurácias de predição dos valores genéticos estimados.

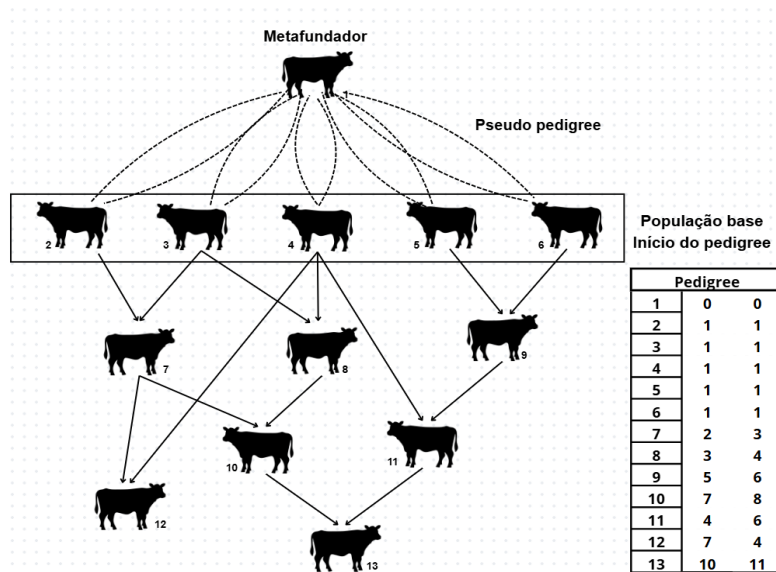


Figura 2. Representação esquemática de uma população de bovinos com metafundador. Adaptado de Legarra *et al.* (2015).

Os MF podem ser definidos como pseudoindivíduos que representam os ancestrais base de uma população. Em contraste com os UPGs tradicionais, que são considerados efeitos fixos no modelo estatístico, os MFs apresentam vantagens, pois permitem a modelagem da endogamia e das relações genéticas entre grupos de base, sendo tratados como efeitos aleatórios. Além disso, promovem ajustes na matriz de parentesco **A**, de modo a torná-la compatível com a matriz genômica **G**, considerando frequências alélicas baseadas em 0,5 (Aguilar *et al.*, 2010; Christensen, 2012).

No ssGBLUP, a matriz de relacionamento **H** integra pedigree e genômica, sendo escrita na forma clássica (sem metafundador) como:

$$H^{-1} = A^{-1} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & G^{-1} - A_{22}^{-1} \end{bmatrix}$$

Em que **A** é a matriz de parentesco do pedigree, **A₂₂** o bloco entre genotipados e **G** a matriz genômica. Quando se utiliza metafundadores, a base ancestral passa a considerar parentesco entre fundadores e **A** é substituída por **A***, incorporando a matriz de covariância **Γ** (Gama), conforme descrito em Legarra *et al.* (2015) e Kluska *et al.* (2021) e :

$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{A}^{*-1} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{G}^{-1} - \mathbf{A}_{22}^{*-1} \end{bmatrix}$$

Segundo Masuda *et al.* (2022), a versão sem MF assume fundadores não relacionados, podendo gerar incompatibilidade entre **A** e **G** em pedigrees incompletos, enquanto a inclusão de MFs ajusta essa base, reduz viés e melhora a consistência das estimativas genômica. O elemento central dessa abordagem é a matriz **Γ**, que descreve as relações dentro e entre MFs. Essa matriz apresenta interpretações específicas:

- $\Gamma_{ii} < 1$: indica uma população base com elevada variabilidade genética;
- $\Gamma_{ii} > 1$: caracteriza uma população base endogâmica;
- $\Gamma_{ij} > 0$: reflete sobreposição genética entre populações fundadoras;
- $\Gamma_{ij} < 0$: sugere divergência entre populações fundadoras.

A estimação de **Γ** é realizada a partir de dados genotípicos, geralmente por meio de métodos de mínimos quadrados generalizados (*Generalized Least Squares* – GLS). Para garantir acurácias adequadas com o uso da metodologia, é necessário um número adequado de animais genotipados que apresentem conexão com os metafundadores.

Uso de MFs tem sido aplicado em diferentes espécies, especialmente em estudos com populações multirraciais de bovinos de corte (Junqueira *et al.*, 2020; Tonussi *et al.*, 2021) e suínos (Aldridge *et al.*, 2020; Fu *et al.*, 2021). Neste sentido, a utilização de MFs tem trazido maior acurácia de seleção em cenários multirraciais e envolvendo cruzamentos. No entanto, apesar desses avanços, a aplicação prática ainda enfrenta desafios relevantes. Em especial, a estimação da matriz **Γ**, que representa as covariâncias entre os MFs, pode resultar em valores pouco plausíveis do ponto de vista biológico, sobretudo em populações mais complexas (Kudinov *et al.*, 2022). Além disso, a obtenção de estimativas robustas requer quantidade adequada de dados genômicos, já que a baixa conectividade entre indivíduos pode comprometer os resultados.

Outro aspecto importante refere-se ao escalonamento de variâncias, visto que, em alguns contextos, não é recomendado estimar diretamente os componentes de variância com o uso de MFs (Legarra *et al.*, 2015). O conceito

de MFs representa um avanço teórico e aplicado nas avaliações genômicas, ao possibilitar maior integração entre informações de pedigree e genômica, favorecer o tratamento de pedigrees incompletos e proporcionar incremento na acurácia das predições genéticas.

4. Pedigrees truncados em avaliações genética de animais domésticos

Em avaliações genômicas, nem sempre é necessário utilizar todas as informações históricas disponíveis do animal ou população analisada. Nesse contexto, o truncamento de pedigrees se apresenta como uma forma de limitar a quantidade de informações trabalhadas, mantendo apenas as mais significativas, visto que, pedigrees incompletos ou populações cuja estrutura é incerta podem comprometer as avaliações genéticas (Meyer, 2021). Assim, o truncamento de pedigrees consiste na remoção de informações antigas, desnecessárias ou incompletas do pedigree utilizado na avaliação (Bussiman *et al.*, 2023), reduzindo vieses e otimizando os custos computacionais sem comprometer a acurácia das predições genéticas. Essa manobra é útil principalmente quando não há conhecimento sobre a genealogia dos progenitores dos animais fundadores da população. Nestes casos, utilizar o truncamento a partir de gerações mais novas pode ser mais vantajoso do que utilizar gerações mais antigas com informações inconsistentes.

Estudos em diferentes espécies mostram que o truncamento pode contribuir no aumento dos ganhos genéticos, reduzindo vieses nas predições dos valores genéticos. Cesarani *et al.* (2021), avaliando bovinos de leite, concluíram que, a combinação do truncamento do pedigree com informações genômicas de UPG trouxe vantagens em termos de predição. Em suínos, Pocrnic *et al.* (2017) mostrou que reduzir a profundidade do pedigree para cerca de 2-5 gerações não afetou a acurácia das predições genômicas para animais genotipados. Já em búfalos, o truncamento combinado a dados genômicos pode melhorar a acurácia e reduzir vieses (Melo *et al.*, 2024). Além disso, o truncamento pode atuar na redução de viés associados a mudanças na definição de características ao longo do tempo, causadas por alterações de manejo dos animais, ambiente ou metodologias de mensuração (Tsuruta *et al.*, 2005; Howard *et al.*, 2018).

Em bubalinos da raça Murrah, Melo *et al.* (2024), observam que o número de gerações utilizadas depende da estrutura da população e da característica avaliada. Já em bovinos de leite e suínos, Lourenco *et al.* (2014). afirma que a utilização de cerca de duas gerações foi suficiente para manter, e em alguns casos até melhorar, a acurácia das predições. Tal característica é particularmente interessante em espécies com intervalos de geração mais curtos, em que a informação das gerações mais antigas têm menor relevância (Mäntysaari *et al.*, 2020).

Outro aspecto a ser levado em consideração nas avaliações genéticas é o elevado processamento computacional requerido, visto que, o uso de grandes volumes de dados aumenta consideravelmente o custo das análises genômicas, especialmente em populações intensamente genotipadas. Nessa perspectiva, Bussiman *et al.* (2023) destaca que o truncamento reduz o número de equações a serem resolvidas, o que diminui os custos computacionais. Tal prática foi aplicada com sucesso em estudos com bovinos de leite, suínos e ovinos de leite (Lourenco *et al.*, 2014; Howard *et al.*, 2018; Hollifield *et al.*, 2021; Macedo *et al.*, 2022). Contudo, a decisão sobre quantas gerações manter deve considerar fatores como herdabilidade da característica, número de registros e intervalo de gerações, contribuindo para eficiência e confiabilidade dos programas genéticos, qualidade das informações, custo computacional e acurácia das predições genéticas.

5. O Papel da genômica na resolução de pedigrees incompletos

Historicamente, os programas de melhoramento genético dependiam quase que exclusivamente de informações fenotípicas e de registros genealógicos para estimar o mérito genético dos animais domésticos. Durante décadas, essa abordagem foi a base do melhoramento genético, possibilitando avanços importantes na produção de animais geneticamente superiores com as características desejadas (Çelik, 2024). No entanto, a principal limitação dessa prática estava diretamente relacionada à qualidade e à correta coleta das informações de pedigree. Em muitos casos, a falta de registros parentais ou erros na coleta de dados compromete a confiabilidade das estimativas genéticas, levando a interpretações equivocadas da contribuição genética dos indivíduos

(Pimentel *et al.*, 2024). Nesse sentido, Wolak e Reid (2017) destacam que, em populações base, é difícil encontrar pedigrees completos, resultando em conexões genealógicas incertas. Apesar de levantar tal discussão para populações de animais silvestres/selvagens, tal premissa se aplica também a populações de animais domésticos. De forma semelhante, Speed e Balding (2015) apontam que a falta de informações completas nos registros implica em coeficientes de parentesco imprecisos, prejudicando cálculos de endogamia e dificultando a distinção entre efeitos genéticos e ambientais. Essa fragilidade afeta não apenas a seleção dos melhores animais, mas também a previsão do ganho genético esperado, que passa a ser subestimado em função da ausência de vínculos genealógicos confiáveis (Gómez *et al.*, 2021).

Com os avanços da biologia molecular, novas ferramentas começaram a ser incorporadas aos programas de melhoramento genético. O uso de marcadores moleculares clássicos, como microssatélites e RFLPs, que permitem identificar associações entre regiões específicas do genoma e características quantitativas de interesse. Esses marcadores possibilitaram o mapeamento de QTLs (*Quantitative Trait Loci*) especialmente para características quantitativas, facilitando a identificação de genes responsáveis por variações genéticas de interesse (Meuwissen *et al.*, 2001). A seleção genômica, por outro lado, significativamente impactou no aumento da acurácia das predições genéticas. Koning (2016) descreve essa abordagem com base na utilização de dados genotípicos e fenotípicos da população de referência para construir equações de previsão do mérito genético dos indivíduos candidatos à seleção. Dessa forma, foi possível avaliar animais jovens sem depender de informações de progênie ou apenas de registros fenotípicos individuais. Ibtisham *et al.* (2017) reforçam que esse benefício da seleção genômica foi fundamental, pois permitiu reduzir o intervalo de gerações e aumentar a taxa de ganho genético. Além disso, a avaliação pode ser aplicada inclusive em embriões, antecipando decisões de seleção que antes dependiam de longos períodos de observação. Especialmente no caso de pedigrees incompletos, Tonussi *et al.* (2017) ressaltam que, com informações genômicas, é possível identificar relações genéticas mesmo entre animais cujo pedigree é desconhecido ou

incerto, otimizando estratégias de acasalamento e aumentando a rentabilidade do rebanho.

Entre os modelos estatísticos que mais se destacam na incorporação de informações genômicas está o GBLUP (*Genomic Best Linear Unbiased Prediction*), que substitui a matriz de parentesco tradicional, derivada do pedigree, pela matriz genômica construída a partir de das informações dos marcadores moleculares (Boichard *et al.*, 2016). Posteriormente, Misztal *et al.* (2009) desenvolveram o método ssGBLUP (*Single-Step GBLUP*), que combina em um procedimento de único passo a informação de todos os animais disponíveis, sejam eles genotipados ou não. Para calcular o parentesco entre os animais usando esse modelo, é necessário a utilização da matriz $\mathbf{H}^{-1}$, que integra informações das matrizes $\mathbf{A}^{-1}$ e a inversa da matriz de parentesco genômico ($\mathbf{G}^{-1}$) (Legarra *et al.*, 2009; Aguilar *et al.*, 2010; VanRaden, 2020). Enquanto, para estimar os valores genéticos genômicos (GEBVs), é necessário substituir a inversa da matriz $\mathbf{A}^{-1}$ pela inversa da matriz $\mathbf{H}^{-1}$. Apesar de sua ampla utilização e de sua capacidade de reduzir vieses em comparação a outros métodos, o ssGBLUP ainda depende, em certa medida, da consistência dos pedigrees. Quando há muitas informações ausentes, a formação das matrizes $\mathbf{A}$ e $\mathbf{G}$ pode ser afetada, resultando em GEBVs tendenciosos (Masuda *et al.*, 2022).

No contexto da era genômica, o uso de haplótipos também tem se mostrado uma ferramenta interessante para superar as limitações impostas por impostas por pedigrees incompletos no melhoramento genético animal. Os haplótipos são blocos de variações no DNA que são herdados em conjunto, o que proporciona uma visão mais detalhada e precisa das relações dos indivíduos (Legarra *et al.*, 2009). Essa metodologia é valiosa quando pensamos em pedigrees incompletos, situação comum em muitas populações comerciais e de base (Junqueira *et al.*, 2020). A partir da comparação dos haplótipos é possível identificar segmentos genômicos idênticos por descendência (IBD), revelando vínculos genéticos que não foram detectados pelo pedigree tradicional (Périte *et al.*, 2016), conforme mostra a Figura 3.

A integração de informações de haplótipos contribui significativamente para corrigir falhas nas informações parentais, reduzindo o viés nas estimativas genéticas e aumentando a acurácia da predição de mérito genético, o que se

traduz em programas de seleção mais eficientes e confiáveis (Romeiro *et al.*, 2013; Garrick, 2011). Isso permite que programas de seleção superem as barreiras tradicionais impostas por pedigrees incompletos, buscando sempre manter um progresso contínuo nos programas de melhoramento (Hayes *et al.*, 2007).

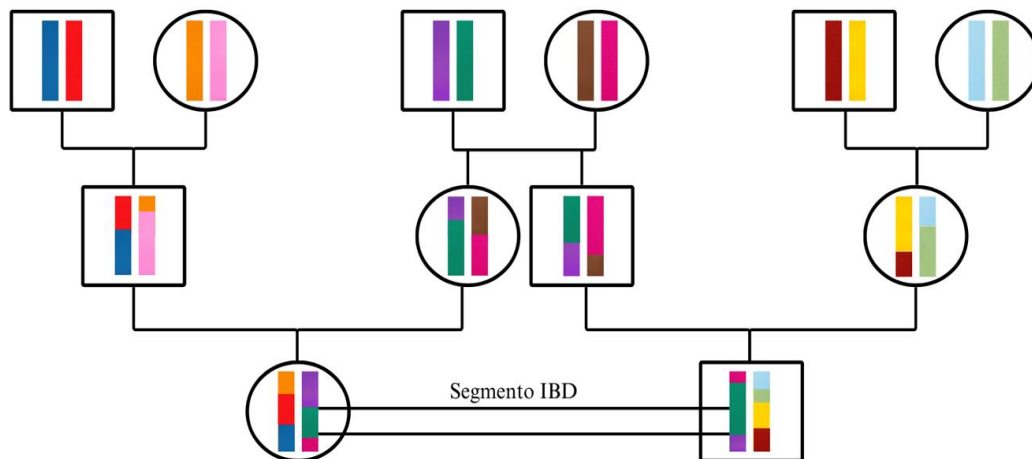


Figura 3. Representação da transmissão de haplótipos em uma genealogia, destacando um segmento IBD herdado de um ancestral comum.

6. Tutoria GitHub:

Link de acesso ao tutorial para o passo a passo para realizar análises BLUP, ssGBLUP, com inclusão de UPG, MFs e sistema de truncamento em avaliações genéticas: <https://github.com/danielealves-sys/TutorialUpgMfTrunc>

7. Considerações finais

As metodologias apresentadas neste capítulo são potenciais e efetivas para solucionar a problemática dos pais desconhecidos em pedigrees de animais domésticos. Cada abordagem oferece uma forma distinta de lidar com essas incertezas, contribuindo para melhorar de maneira significativa as estimativas dos valores genéticos em avaliações tradicional e genômica. Assim a escolha entre utilizar UPGs, MFs ou pedigree truncado deve ser cuidadosamente orientada pelas características específicas da população em estudo.

8. Referências bibliográficas

- AGUILAR, Ignacio *et al.* Hot topic: A unified approach to utilize phenotypic, full pedigree, and genomic information for genetic evaluation of Holstein final score. **J Dairy Sci** 93:743–752. 2010. <https://doi.org/10.3168/JDS.2009-2730>.
- ALDRIDGE, Michael *et al.* Variance estimates are similar using pedigree or genomic relationships with or without the use of metafounders or the algorithm for proven and young animals 1. **J Anim Sci** 98. 2020.<https://doi.org/10.1093/JAS/SKAA019>.
- BOICHARD, Didier *et al.* Genomic selection in domestic animals: Principles, applications and perspectives. **C R Biol** 339:274–277. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2016.04.007>.
- BRADFORD, Heather *et al.* Modeling missing pedigree in single-step genomic BLUP. **J Dairy Sci** 102:2336–2346. 2019. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15434>.
- BUSSIMAN, Fernando *et al.* Boundaries for genotype, phenotype, and pedigree truncation in genomic evaluations in pigs. **J Anim Sci** 101. 2023. <https://doi.org/10.1093/jas/skad273>.
- CESARANI, Alberto *et al.* Genomic predictions for yield traits in US Holsteins with unknown parent groups. **J Dairy Sci** 104:5843–5853. 2021. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19789>.
- CHRISTENSEN, Ole. Compatibility of pedigree-based and marker-based relationship matrices for single-step genetic evaluation. 2012. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-44-37>.
- ÇELİK, Şeyda. Bibliometric analysis of genomic selection in breeding of animal from 1993 to 2024: global trends and advancements. **Front Genet** 15. 2024. <https://doi.org/10.3389/fgene.2024.1402140>
- FU, Chuanke *et al.* Single-step genomic evaluation with metafounders for feed conversion ratio and average daily gain in Danish Landrace and Yorkshire pigs. **Genetics Selection Evolution** 53.2021. <https://doi.org/10.1186/s12711-021-00670-x>.
- GARRICK, J. Dorian. The nature, scope and impact of genomic prediction in beef cattle in the United States. **Genetics Selection Evolution** 43. 2011. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-43-17>.
- GÓMEZ, Mayra *et al.* Accounting for Genetic Differences Among Unknown Parents in *Bubalus bubalis*: A Case Study From the Italian Mediterranean Buffalo. **Front Genet** 12. 2021. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.625335>.
- HAYES, John *et al.* Accuracy of marker-assisted selection with single markers and marker haplotypes in cattle. **Genet Res** 89:215–220.2007. <https://doi.org/10.1017/S0016672307008865>.

- HOLLIFIELD, Mary *et al.* Determining the stability of accuracy of genomic estimated breeding values in future generations in commercial pig populations. **J Anim Sci** 99.2021. <https://doi.org/10.1093/jas/skab085>.
- HOWARD, Jeremy *et al.* The impact of truncating data on the predictive ability for single-step genomic best linear unbiased prediction. **Journal of Animal Breeding and Genetics** 135:251–262.2018. <https://doi.org/10.1111/jbg.12334>.
- IBTISHAM, Fahar *et al.* Genomic selection and its application in animal breeding. **Thai Journal of Veterinary Medicine** 47:301–310. 2017. <https://doi.org/10.56808/2985-1130.2838>.
- JUNQUEIRA, Vinícius *et al.* Applying the Metafounders Approach for Genomic Evaluation in a Multibreed Beef Cattle Population. **Front Genet** 11. 2020. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.556399>.
- KLUSKA, Sabrina *et al.* Metafounders May Reduce Bias in Composite Cattle Genomic Predictions. **Front Genet** 12. 2021. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.678587>.
- KONING, Dirk-Jan *et al.* On genomic selection. **Genetics** 203:5–7.2016. <https://doi.org/10.1534/genetics.116.189795>.
- KUDINOV, Andrei *et al.* Single-step genomic BLUP with many metafounders. **Front Genet** 13. 2022. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.1012205>.
- LEGARRA, Andrés; AGUILAR, Ignacio and MISZTAL, Inacy. A relationship matrix including full pedigree and genomic information. **J Dairy Sci** 92:4656–4663.2009. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2061>.
- LEGARRA, Andrés *et al.* Ancestral relationships using metafounders: Finite ancestral populations and across population relationships. **Genetics** 200:455–468.2015. <https://doi.org/10.1534/genetics.115.177014>.
- LOURENCO, Daniela *et al.* Are evaluations on young genotyped animals benefiting from the past generations? **J Dairy Sci** 97:3930–3942.2014. <https://doi.org/10.3168/JDS.2013-7769>.
- MACEDO, Fernando *et al.* Removing data and using metafounders alleviates biases for all traits in Lacaune dairy sheep predictions. **J Dairy Sci** 105:2439–2452. 2022. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20860>.
- MÄNTYSAARI, Esa; KOIVULA, Minna and STRANDÉN, Ismo. Symposium review: Single-step genomic evaluations in dairy cattle. **J Dairy Sci** 103:5314–5326.2020. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17754>.
- MASUDA, Yutaka, P.M. *et al.* Invited review: Unknown-parent groups and metafounders in single-step genomic BLUP. **J Dairy Sci** 105:923–939. 2022. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20293>.

- MELO, Thaise *et al.* Unknown parent groups and truncated pedigree in single-step genomic evaluations of Murrah buffaloes. **J Dairy Sci** 107:8130–8140. 2024. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24608>.
- MEUWISSEN, T.H.E., B.J. HAYES, and M.E. GODDARD. Prediction of Total Genetic Value Using Genome-Wide Dense Marker Maps. 2001. **Genetics Society of America**. <https://doi.org/10.1093/genetics/157.4.1819>
- MEYER, Karin. Impact of missing pedigrees in single-step genomic evaluation. **Anim Prod Sci** 61:1760–1773. 2021. <https://doi.org/10.1071/AN21045>.
- MISZTAL, Inacy; LEGARRA, Andrés and AGUILAR, Ignacio. Computing procedures for genetic evaluation including phenotypic, full pedigree, and genomic information. **J Dairy Sci** 92:4648–4655. 2009. <https://doi.org/10.3168/JDS.2009-2064>.
- MISZTAL, Inacy *et al.* Unknown-parent group in single-step genomic evaluation. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, Berlin, v. 130, n. 4, p. 252-258, 1 Aug.213. <https://doi.org/10.1111/jbg.12025>.
- MISZTAL, Inacy *et al.* Current status of genomic evaluation. **Journal of Animal Science**, v.98(4), p. 1-14. 2020. Available at <https://doi.org/10.1093/jas/skaa101>.
- PÉRTILE, Simone *et al.* Seleção e associação genômica ampla para o melhoramento genético animal com uso do método ssGBLUP. **Pesqui Agropecu Bras** 51:1729–1736. 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016001000004>.
- PIMENTEL, E.C.G. *et al.* How pedigree errors affect genetic evaluations and validation statistics. **J Dairy Sci** 107:3716–3723. 2024. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24070>
- POCRNIC, Ivan *et al.* Technical note: Impact of pedigree depth on convergence of single-step genomic BLUP in a purebred swine population. **J Anim Sci** 95:3391. 2017. <https://doi.org/10.2527/jas2017.1581>.
- QUAAS, Richard. Additive Genetic Model with Groups and Relationships. **J Dairy Sci** 71:1338–1345. 1988. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(88\)79691-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(88)79691-5).
- ROMEIRO, Gilberto., *et al.* Genômica Aplicada ao Melhoramento Genético de Gado de Corte. 2013. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/980608/1/MelhoramentoGeneticoCapitulo17.pdf> (acessado 16 de setembro de 2025).
- SARMENTO, José *et al.* Desmistificando a avaliação genética animal. **Revista Científica de Produção Animal**. V25 (26–35). 1415-563x. 2023.
- SPEED, Doug and Balding, David. Relatedness in the post-genomic era: Is it still useful? **Nat Rev Genet** 16:33–44. 2015. <https://doi.org/10.1038/nrg3821>.

- TONUSSI, Rafael *et al.* Application of single step genomic BLUP under different uncertain paternity scenarios using simulated data. **PLoS One** 12. 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181752>.
- TSURUTA, Shogo; MISZTAL, Ignacy and LAWLOR, Thomas. Changing definition of productive life in US holsteins: Effect on genetic correlations. **J Dairy Sci** 88:1156–1165. 2005. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72782-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72782-X).
- VANRADEN, Paul. Efficient methods to compute genomic predictions. **J Dairy Sci** 91:4414–4423. 2008. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0980>.
- VANRADEN, Paul. Symposium review: How to implement genomic selection. **J Dairy Sci** 103:5291–5301. 2020. <https://doi.org/10.3168/JDS.2019-17684>.
- WOLAK, Matthew and REID, Jane. Accounting for genetic differences among unknown parents in microevolutionary studies: how to include genetic groups in quantitative genetic animal models. **Journal of Animal Ecology** 86:7–20. 2017. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12597>.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes).

Autores

Daniele Alves¹, Saymon Rocha¹, Thais Machado¹, Jeriel Dias¹, Heloísa Furlani¹, Kettlen Neves¹, Sirlene Lazaro², Hinayah Rojas de Oliveira³, Thaise Pinto de Melo¹

¹ Departamento de Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil; ² Departamento de Biociência Animal, Universidade de Guelph, Canadá; ³ Departamento Zootecnia, Universidade de Purdue, West Laffayette, Estados Unidos.

CAPÍTULO 4

Peso ótimo de abate de suínos no contexto da zootecnia de precisão

Dejanir Pissini, Marcos Luis Cassal, Paulo Santana Pacheco, Vladimir de Oliveira

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-39-8.c4>

Resumo

A determinação do peso ideal de abate é uma decisão estratégica central na suinocultura, especialmente para produtores independentes, cuja rentabilidade é diretamente afetada por flutuações nos custos de produção e preços de mercado. Este capítulo apresenta e discute as saídas de um modelo conceitual e matemático desenvolvido para estimar o peso ótimo de abate de suínos com base na margem de contribuição, integrando variáveis zootécnicas (crescimento e consumo de ração) e econômicas (custos variáveis e receita líquida). O modelo foi estruturado em módulos interdependentes, implementado em Python e disponibilizado em interface web, permitindo cálculos automáticos e geração de gráficos interativos. Simulações utilizando séries históricas de preços de milho, farelo de soja e suíno, ajustadas pelo IGP-DI (2013–2024), e testes de sensibilidade demonstraram que o peso ótimo de abate varia conforme a margem de contribuição e a relação preço suíno/milho. Resultados indicaram que, em cenários de baixa margem, o abate precoce é economicamente mais vantajoso, enquanto em situações favoráveis o prolongamento do ciclo produtivo aumenta o peso de abate e a lucratividade. As análises demonstraram que o peso médio ótimo de abate foi de $106,02 \pm 35,06$ e $115,11 \pm 27,78$, quando foram consideradas todas as simulações ou apenas as que apresentaram margem de contribuição positiva, respectivamente. O modelo mostrou-se sensível às variações nos preços dos principais insumos, fornecendo uma ferramenta prática para apoiar decisões estratégicas e maximizar a rentabilidade da produção de suínos.

Palavras-chave: economia da produção; modelagem matemática; peso de abate; suinocultura; zootecnia de precisão.

1. Introdução

A suinocultura é uma atividade agropecuária consolidada mundialmente e praticada com o objetivo primordial de fornecer matéria prima de alta qualidade para elaboração de produtos destinados à alimentação humana. No Brasil, um dos maiores produtores globais de carne suína, grande parte da produção ocorre dentro do sistema de integração, no qual boa parte das decisões estratégicas ficam a cargo de uma empresa ou cooperativa. Contudo, inúmeros produtores operam fora deste sistema, constituindo o grupo de suinocultores denominados, genericamente, de “suinocultores independentes” (Miele e Almeida, 2023). Os suinocultores independentes são, em geral, mais vulneráveis a momentos de instabilidade econômica da suinocultura (Alves *et al.*, 2022).

Uma das características marcantes da suinocultura brasileira é o elevado grau de tecnificação (Barcellos *et al.*, 2011). Tecnologias associadas a conceitos como os de “Zootecnia de Precisão” deverão ganhar impulso e impactar, ainda mais, a suinocultura brasileira nas próximas décadas. Contudo, o objetivo não deve ficar restrito apenas a monitoria das condições alojamento e aspectos do comportamento e desempenho animal, e, sim, a efetiva integração destas informações visando a tomada de decisões que promovam, cada vez mais, a sustentabilidade do sistema de produção (Pomar *et al.*, 2019; Laca, 2019).

Entre as decisões estratégicas que precisam ser tomadas pelos suinocultores, em especial os independentes, está a definição do peso de abate, a qual tem grande importância para os resultados econômicos da atividade. Embora a escolha do momento de abater os animais possam estar condicionada a fatores que independem da vontade do suinocultor (mercado comprador, instalações e equipamentos, etc.) é fundamental que se tenha clareza sobre oportunidades auferidas e ou desperdiçadas para um dado peso de abate (Pinheiro *et al.*, 1983; Santos Filho *et al.*, 2018).

A criação comercial de suínos está sujeita aos paradigmas macro e microeconômicos e, portanto, necessita de monitoramento econômico/financeiro. Tomando-se como exemplo a fase de terminação, é possível assumir, da perspectiva econômica, a seguinte situação: os leitões que chegam à engorda (terminação), representam um custo ao produtor. Posteriormente, estes animais recebem investimentos na forma de insumos

diversos com a finalidade de agregar valor e, por fim, serem comercializados visando gerar receitas (Santos Filho e Bertol, 2018).

Considerando que o custo do suíno criado para o abate é variável por unidade de peso vivo, enquanto a receita aumenta linearmente com o peso, fica fácil entender que a relação entre custo e receita, ou seja, o lucro, varia com o peso vivo (Rocha *et al.*, 2007). Em um cenário ideal em que o objetivo seja o de maximizar a lucratividade, o ponto ótimo de abate será aquele em que a relação entre custo e receita é máxima. Ao contrário, em cenários de lucratividade negativa, o ponto ótimo de abate é aquele no qual a relação entre custo e receita é minimizada (Henke, 2000; Rocha *et al.*, 2007).

A questão do peso ótimo de abate de suínos foi abordada em outros estudos (Santos Filho *et al.*, 2018; Henke, 2000). Nestes, o peso ideal de abate foi definido como base na relação entre receitas e custos totais, que englobam os custos fixos e variáveis. Em razão de dificuldades para obter determinados componentes do custo fixo, tem se proposto o uso de outras métricas de desempenho econômico que poderiam facilitar a estimativa do ponto ótimo de abate, contribuindo para a efetivação de análises econômicas/financeiras da atividade. A margem de contribuição, definida como a diferença entre o preço de venda e as despesas variáveis associadas à produção e comercialização dos animais (Padoveze, 2015) pode representar uma alternativa nesse caso.

A margem de contribuição é um indicador essencial que define o quanto cada suíno efetivamente contribui para cobrir os custos fixos e gerar lucro. Sendo útil para decisões estratégicas, como a definição do peso ideal de abate e otimização da produção para maximizar ganhos. Uma das limitações da margem de contribuição é não considerar os custos fixos na análise. Assim, o seu uso isolado pode comprometer a sustentabilidade financeira da empresa a longo prazo. Análises financeiras adicionais, como o ponto de equilíbrio, que determina o volume mínimo de vendas necessário para cobrir todos os custos, e a lucratividade global, que garante uma visão completa do desempenho financeiro do negócio, são recomendadas (Pissinin *et al.*, 2025).

A integração de informações referentes ao desempenho animal com dados de despesas de produção e comercialização por meio de modelo conceitual e matemático implementado num software de fácil utilização, pode

auxiliar na tomada de decisão, especialmente na suinocultura independente. Assim, o objetivo, neste capítulo, é propor uma nova estrutura (modelo) conceitual e matemática que integra dados de desempenho animal, custos variáveis e receitas para estimar o peso ótimo de abate de suínos.

2. Modelização conceitual e matemática

O peso ideal de abate foi estimado por meio de um modelo concebido conceitualmente e formalizado matematicamente, integrando variáveis produtivas (crescimento e consumo) e econômicas (custos variáveis e receitas). O sistema foi estruturado em módulos interdependentes, representados em fluxograma (Figura 1), que formaliza as entradas, os processamentos e as saídas do modelo.

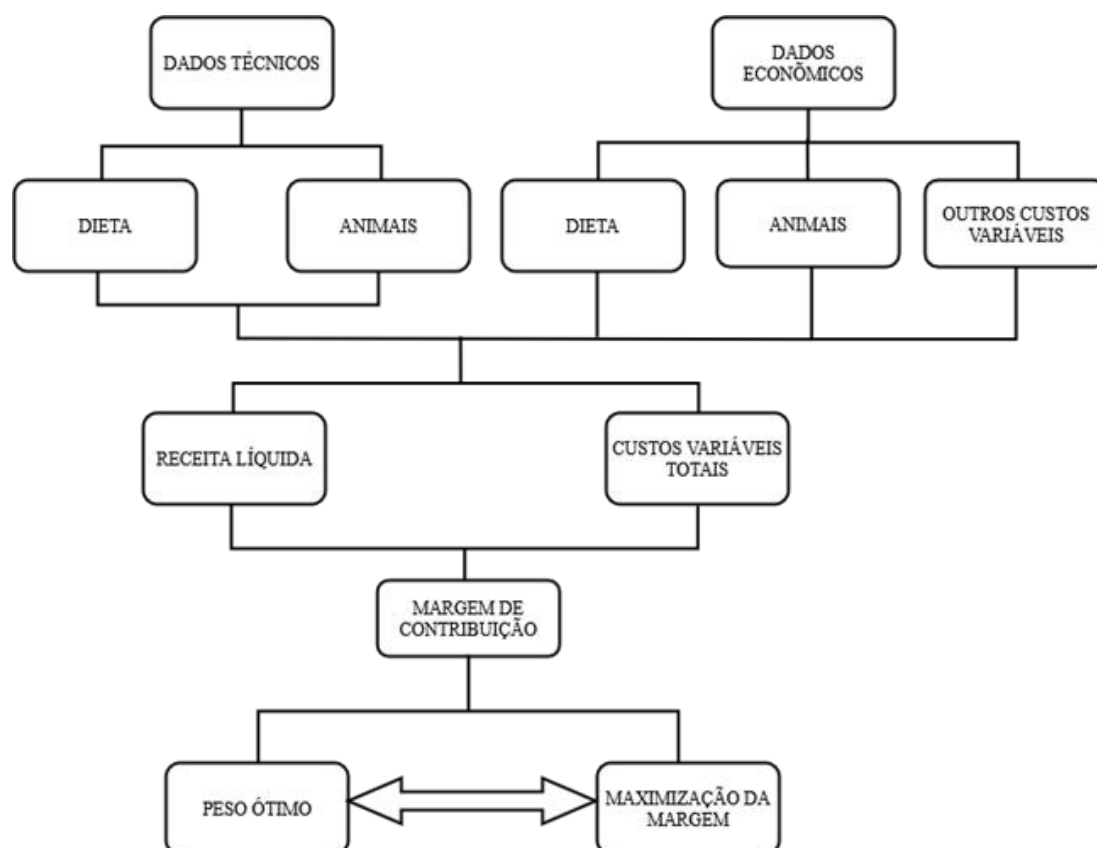


Figura 1. Fluxograma do modelo usado para determinar o peso ótimo de abate de suínos (Fonte: Pissinin *et al.*, 2025).

O critério de decisão adotado foi a maximização da margem de contribuição (MC), definida como a diferença entre a receita obtida pela venda do animal e os custos variáveis de produção. Assim, o peso ótimo de abate foi identificado no ponto em que a MC alcançou o seu valor máximo, garantindo uma medida de rentabilidade diretamente aplicável à realidade produtiva.

2.1. Estrutura conceitual

Crescimento dos suínos: descrito pela equação de Gompertz, amplamente empregada em organismos vivos devido à característica de taxa relativa de crescimento decrescente, resultando em curva sigmoide.

Consumo de ração: modelado por equação sigmoide (Gompertz modificado), refletindo a evolução do consumo ao longo do ciclo produtivo.

Dieta e custos alimentares: o custo diário da ração foi obtido a partir da composição, do consumo estimado e dos preços dos insumos (milho, farelo de soja e demais ingredientes), considerando variações de mercado.

Custos adicionais: contemplam custo de aquisição do leitão, mão de obra, despesas veterinárias, energia, água, transporte, mortalidade e demais custos variáveis. Esses componentes são acumulados ao longo do ciclo produtivo.

Receita líquida: calculada pelo produto entre o peso vivo e o preço de venda do suíno, descontados impostos e encargos.

Margem de contribuição: diferença entre receita líquida e custos variáveis, utilizada como indicador central do modelo. O ponto ótimo de abate foi definido como o peso vivo em que a margem de contribuição é maximizada.

2.2. Estrutura matemática

Equação de crescimento (Gompertz):

$$M = A \cdot e^{\{-e^{-B \cdot (t - C)}\}}$$

em que:

M = massa corporal (kg), t a idade (dias)

A = peso assintótico,

B = taxa de crescimento relativa

C = idade no ponto de inflexão.

Consumo diário (Gompertz modificado)

$$CR = A * \exp \exp (-B * \exp \exp (-k * x))$$

em que:

CR = consumo diário (kg/dia)

x = idade (dias)

A, B, k = parâmetros ajustáveis.

Custo da dieta (D):

$$D = \sum_{i=1}^n (m * x)$$

em que:

D = Custo por kg de ração (R\$)

x = Quantidade do ingrediente i (kg/kg)

m = Preço do ingrediente i (R\$/kg)

Σ = Somatório

Custo do leitão (CL):

$$CL(R\$) = PV(Kg) * V\left(\frac{R\$}{kg}\right)$$

em que:

CL = é o custo do leitão

PV_a = peso vivo na aquisição

V = valor do leitão no mercado por kg

Receita líquida (RL):

$$RL = (PV_v \cdot Pkg) - I$$

em que:

RL = receita líquida

PV_v = peso vivo na venda

Pkg = preço do suíno por kg

I = impostos e encargos.

Margem de contribuição (MC):

$$MC = RL - CV$$

em que:

RL = receita líquida

CV = somatório dos custos variáveis (ração, leitão, mão de obra, despesas operacionais, mortalidade etc.).

2.3. Avaliação do modelo

A avaliação foi conduzida para verificar a precisão das estimativas e a aplicabilidade prática do modelo em diferentes condições produtivas e de mercado.

2.4. Coleta e processamento de dados

Foram utilizados dados de crescimento, consumo, custos e preços de mercado obtidos de diferentes fontes, como: Tabela Brasileira para Aves e Suínos (Rostagno *et al.*, 2017), Embrapa, CEPEA/ESALQ/USP e ACSURS.

As simulações foram desenvolvidas em ambiente Python (PYTHON, 2025), utilizando as bibliotecas NumPy e Pandas (Harris *et al.*, 2020) para manipulação de dados e implementação dos algoritmos. O modelo foi integrado a uma aplicação web construída com Django (Django, 2025) e apoiada no banco de dados PostgreSQL (Postgresql, 2025). Para a interface gráfica, empregaram-se Bootstrap (Bootstrap, 2025) e Chart.js (Chart.Js, 2025), que possibilitaram a apresentação interativa e intuitiva dos resultados.

2.5. Módulos do sistema

Módulo "dietas": armazena as formulações das dietas, contendo a descrição dos ingredientes e suas respectivas proporções. A partir da composição e dos preços unitários dos insumos, o sistema calcula automaticamente o custo por quilograma de ração. Também permite definir os períodos de fornecimento de cada dieta, e, com base na data de início, gera automaticamente as datas de término de cada fase alimentar.

Módulo "curva de crescimento": implementa um modelo matemático baseado na equação de Gompertz, ajustável conforme dados inseridos de idade e peso. A partir desses dados, o sistema realiza a projeção do crescimento diário dos animais, possibilitando ajustes personalizados de acordo com a realidade produtiva.

Módulo "consumo de ração": o consumo diário de alimento é estimado por meio da equação de Gompertz, a mesma utilizada para modelar o crescimento dos animais. Dessa forma, a curva de consumo é proporcional ao desenvolvimento dos suínos, representando de forma realista o aumento do consumo conforme o animal cresce. O modelo permite ainda ajustes nos parâmetros, possibilitando ao usuário adaptá-lo às condições específicas de sua produção.

Módulo "custo da ração": automatiza os cálculos do consumo diário, consumo acumulado e custo acumulado da alimentação ao longo do ciclo de produção, considerando as variações das dietas e os períodos de fornecimento.

Módulo "receita líquida": permite inserir os preços do quilo vivo dos animais em diferentes idades, além de taxas, impostos e demais encargos sobre a venda. A partir desses dados, o sistema calcula a receita líquida gerada.

Módulo "demais custos variáveis": integra informações de custos variáveis além da alimentação e do custo dos leitões, como mão de obra, água, medicamentos e energia elétrica. O sistema distribui esses custos proporcionalmente ao número de animais no lote, gerando o custo médio variável por suíno.

Módulo "custo do leitão": o sistema recebe como entrada o peso, o valor por quilograma e a quantidade de leitões adquiridos. Com essas informações calcula o custo unitário por leitão e o custo total do lote inicial.

Módulo "margem de contribuição": este módulo integra todos os dados anteriores, custo do leitão, custo acumulado da alimentação, demais custos variáveis e receita líquida, para calcular, diariamente, a margem de contribuição ao longo do ciclo produtivo. Esse cálculo é fundamental para a análise econômica e para a determinação do ponto ótimo de abate.

Módulo "ponto ótimo": com base na maximização da margem de contribuição, o sistema identifica o peso ideal de abate. Além dos resultados numéricos, gera automaticamente gráficos dinâmicos que ilustram a evolução da margem de contribuição em função da idade e do peso dos suínos, facilitando a tomada de decisão estratégica.

2.6. Testes de sensibilidade

Para avaliar a robustez do modelo frente a variações nos preços de insumos e do suíno, foram conduzidos testes de sensibilidade. Inicialmente, os parâmetros críticos, como preço do milho, preço do farelo de soja e preço do suíno, foram avaliados em três cenários distintos: otimista, estável e pessimista.

Em seguida, cada parâmetro foi individualmente aumentado em 10%, mantendo os demais constantes, e os efeitos sobre a saída do modelo, especificamente a margem de contribuição por animal, foram analisados. Esse procedimento permitiu quantificar o impacto de alterações nos preços sobre o peso ótimo de abate.

2.7. Simulações

Foram utilizadas séries históricas corrigidas dos preços do suíno, milho e farelo de soja, referentes ao período de 2013 a 2024, ajustadas pelo Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna (IGP-DI), tendo como referência dezembro de 2024. A correlação entre as variáveis de entrada foi previamente calculada e inserida no software Simulación 5.0, integrado ao Microsoft Excel. Nesse ambiente, foi realizada a simulação de Monte Carlo, que ajustou as distribuições de probabilidade mais adequadas para cada variável, com base no teste de Anderson-Darling, e gerou 1.000 cenários conjuntos de preços, respeitando simultaneamente as distribuições ajustadas e as correlações informadas. Os cenários simulados foram então utilizados como dados de entrada no modelo desenvolvido, o qual processa as informações econômicas e zootécnicas para estimar a variável de saída, representada pela margem de contribuição (peso ótimo de abate).

3. Resultados

3.1. Análise de Sensibilidade

Na Tabela 1 é possível verificar que os resultados da análise de sensibilidade indicam que o preço de venda do suíno é o fator com maior impacto sobre a margem de contribuição, com variações positivas que geraram aumentos proporcionais na rentabilidade e no peso ideal de abate. Por outro lado, elevações nos preços dos insumos alimentares impactam negativamente a margem, sendo o milho o insumo de maior sensibilidade relativa. Embora os gastos com insumos para alimentação sejam os mais expressivos, outros elementos, como custos com mão de obra, saúde animal e manejo também influenciam a margem de contribuição, contribuindo para a complexidade da gestão econômica do sistema. Estes resultados estão alinhados à literatura (Henke, 2000; Oliveira, 2011; Pinheiro *et al.*, 1983; Bertol; Santos Filho, 2018), que aponta os custos com alimentação como principal componente da estrutura de custo variável e, portanto, determinante da viabilidade econômica do sistema.

Tabela 1. Análise de sensibilidade da margem de contribuição em função da variação dos principais parâmetros econômicos nos anos de 2012, 2014 e 2019

no	Parâmetro	Base (R\$)	+10% (R\$)	MC Base	MC 10%	P. Base	P. 10%	Sens.
012	Preço de venda (R\$/kg)	2,390	2,630	-31,514	-11,218	75,761	96,264	6,440
014	Preço de venda (R\$/kg)	3,400	3,740	48,018	98,168	146,438	153,474	10,444
019	Preço de venda (R\$/kg)	4,070	4,480	17,130	71,510	130,019	142,342	31,745
012	Milho (R\$/kg)	0,490	0,540	-31,510	-34,660	75,761	60,691	-0,999
014	Milho (R\$/kg)	0,420	0,460	48,018	37,760	146,438	141,507	-2,136
019	Milho (R\$/kg)	0,610	0,670	17,123	4,869	130,194	123,769	-7,156
012	Farelo de soja (R\$)	1,020	1,120	-31,514	-34,224	75,761	62,661	-0,859
014	Farelo de soja (R\$)	1,100	1,210	48,018	39,670	146,438	143,172	-1,738
019	Farelo de soja (R\$)	1,280	1,410	17,123	8,765	130,194	127,468	-4,881

3.2. Simulações

Os resultados da simulação mostraram correlação positiva ($r = 0,705$; $P < 0,000$) entre margem de contribuição e peso ótimo de abate (Figura 2). O peso ótimo de abate médio no caso de margens negativas foi de $49,42 \pm 21,21$ kg, enquanto para margens positivas o peso ótimo de abate médio foi de $115 \pm 27,78$ kg. É importante destacar que o peso ótimo de abate no caso de as margens serem negativas é o peso que minimiza as diferenças entre receita e despesas variáveis. A probabilidade de a margem de contribuição ser positiva ou negativa foi de 86,6% e 13,4%, respectivamente.

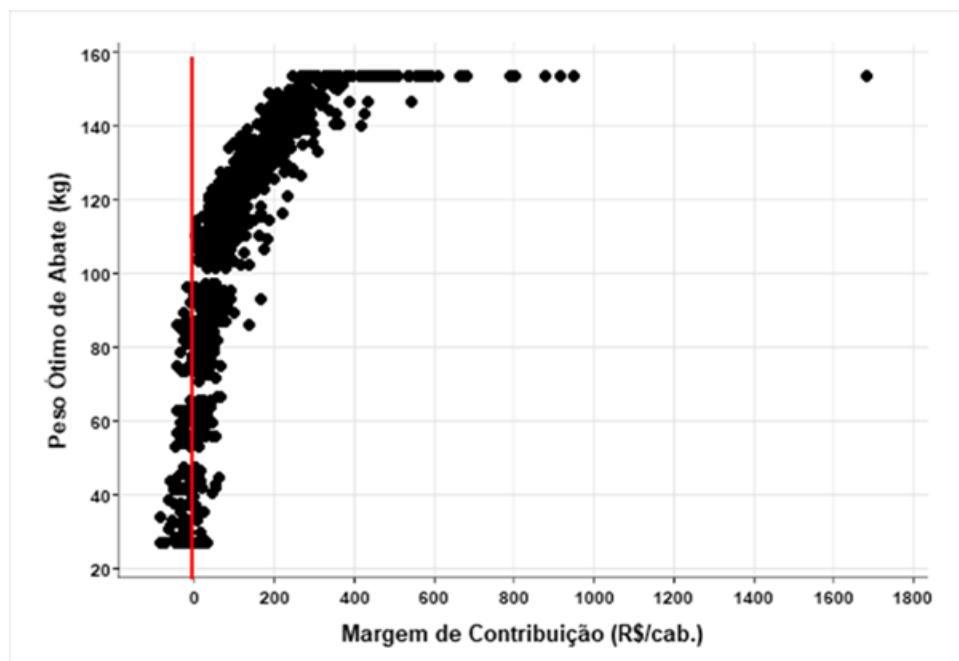


Figura 2. Relação entre margem de contribuição (R\$/cab.) e peso ótimo de abate (kg).

Na Figura 3 são mostradas as relações entre o peso ótimo de abate com o preço do milho (a), preço do farelo de soja (b) e preço recebido pelos suínos (c). Fica evidente que o peso ótimo de abate mantém relações estreitas com os preços pagos pelo milho e recebido pelo suíno.

Quando se plotou a variável relação entre preços do milho e suíno com o peso de abate (Figura 4) ficou claro que há uma tendência de aumento do peso ótimo de abate com o incremento da relação entre os preços recebidos pelo suíno vivo e pago pelo milho. Esta associação já foi revelada em outros estudos (Pinheiro *et al.*, 1983; Rocha *et al.*, 2007) nos quais também se constataram que quanto maior a relação entre preços do suíno e milho, maior será o peso de abate que maximiza a função lucro. Em termos práticos, ao menos duas importantes questões devem ser consideradas. Primeiro, os cálculos são baseados em valores pagos pelo quilo de peso vivo do suíno e ignoram eventuais bonificações pela qualidade de carcaça. Além disso, nossas estimativas não contemplam possíveis aumentos de riscos associados a incrementos do peso de abate.

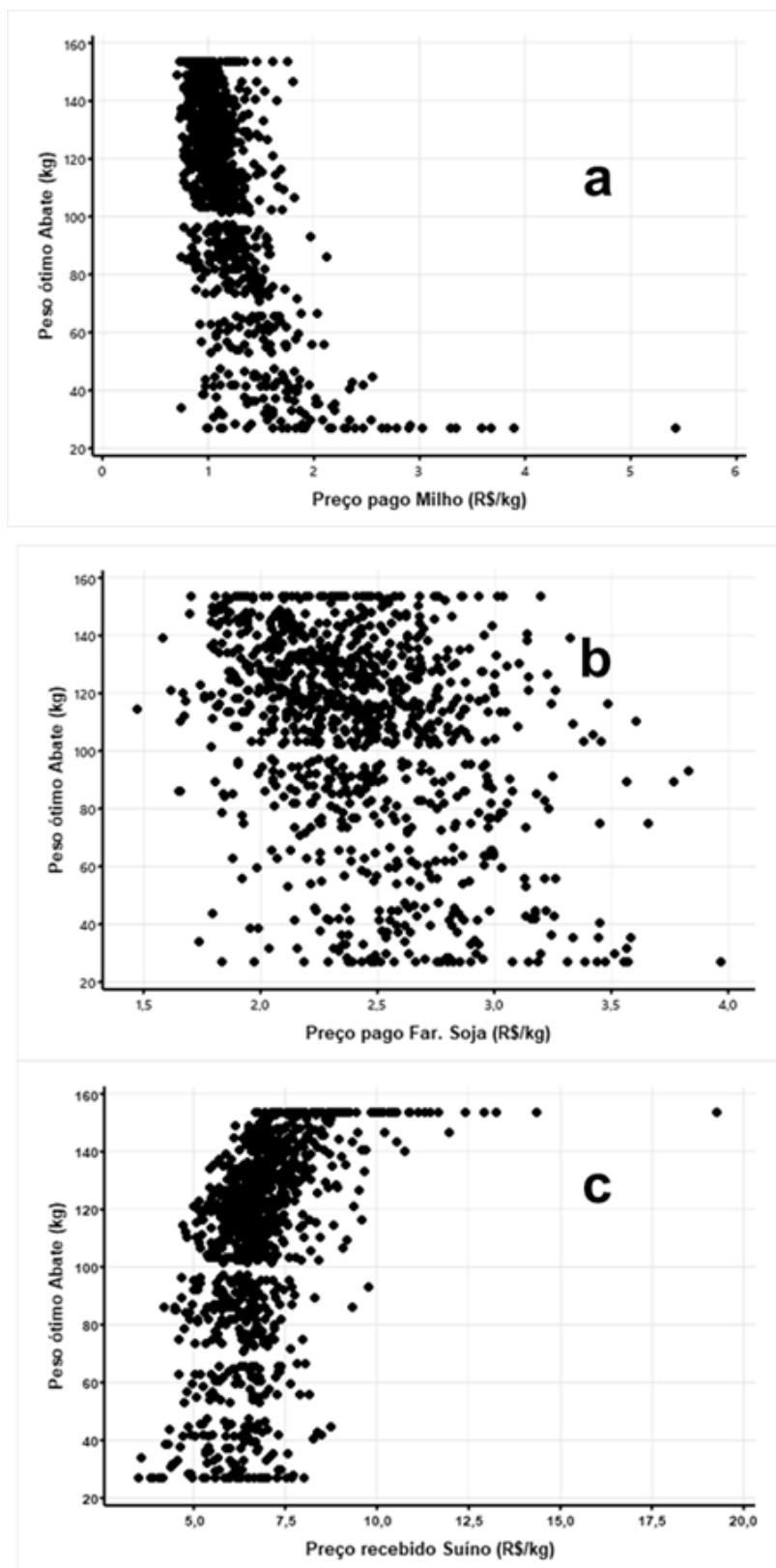


Figura 3. Relação entre preço do milho (R\$/kg) (a), preço do farelo de soja (R\$/kg) (b) e preço do suíno (c) com o peso de abate.

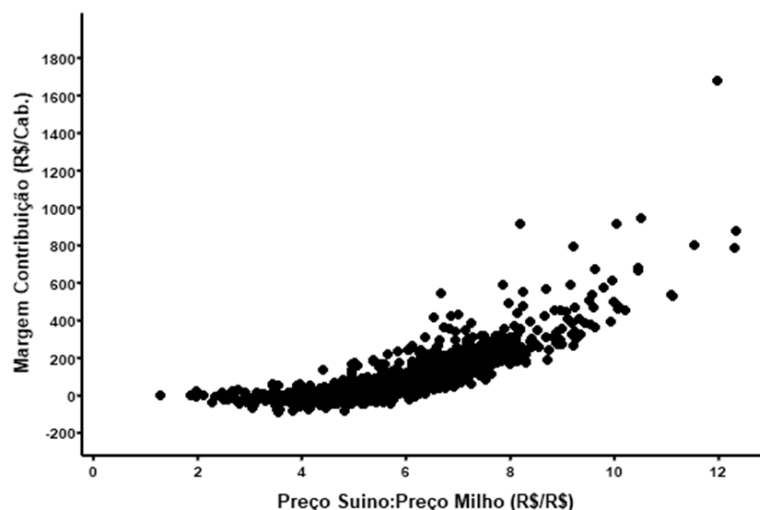


Figura 4. Influência da relação entre preço do suíno e preço do milho (R\$/R\$) na margem de contribuição (R\$/cab.).

Na Figura 5 constata-se como diferentes intervalos da relação suíno:milho se relacionam com a margem de contribuição, quando essa é positiva. Cerca de 90% dos dados de relação suíno:milho se mantiveram na faixa entre 4 a 8, indicando a forte influência desta relação na margem de contribuição positiva, ou seja, a receita superando as despesas variáveis.

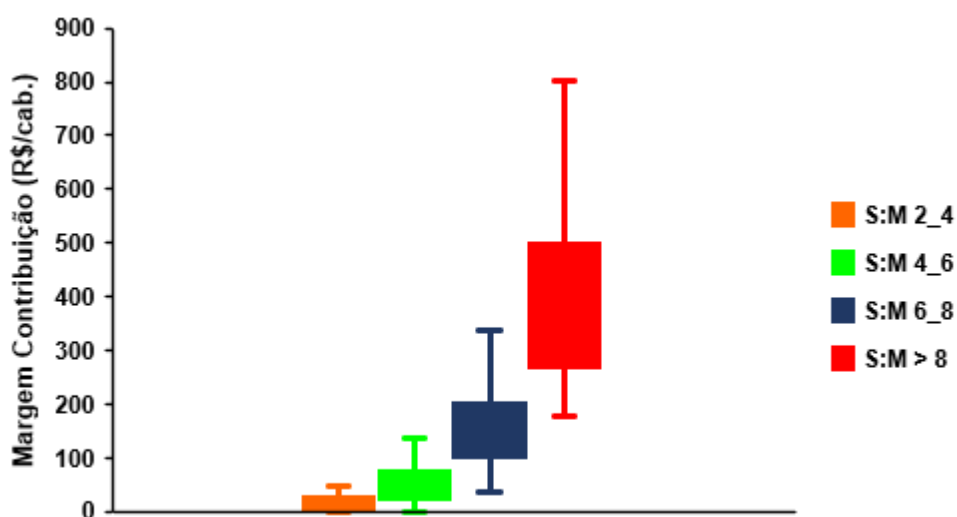


Figura 5. Impacto da relação entre preço do suíno e preço do milho (S:M) na margem de contribuição positiva (R\$/cab.).

A interação simultânea entre essas variáveis e seus efeitos combinados sobre o peso ótimo (Figura 6) se apresenta a relação tridimensional entre o preço do suíno (R\$/kg), o preço do milho (R\$/kg) e o peso ótimo de abate (kg), estimado pelo modelo econômico que usa a margem de contribuição. Observa-se que tanto o preço recebido pelo suíno como o preço pago pelo milho são determinantes da decisão econômica de abate, embora haja uma leve superioridade para a influência do preço do milho no peso ótimo de abate.

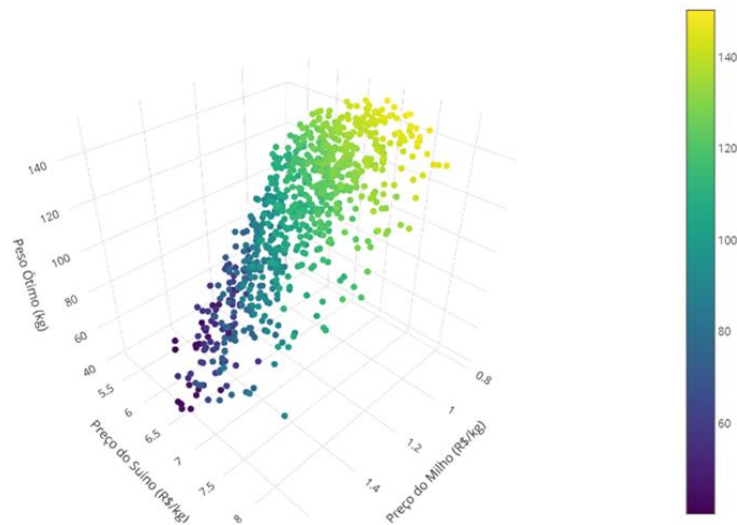


Figura 6. Relação tridimensional entre as variáveis peso ótimo de abate (R/\$), preço do suíno (R\$/kg) e preço do milho (R\$/kg)

4. Considerações finais

O modelo mostrou-se sensível às variações nos preços dos principais insumos, constituindo-se numa ferramenta prática para apoiar decisões estratégicas e maximizar a rentabilidade da produção de suínos.

As simulações evidenciaram que os pesos médios ótimos de abate foram de $106,02 \pm 35,06$ e $115,11 \pm 27,78$, quando consideradas todas as simulações ou apenas as que apresentaram margem de contribuição positiva, respectivamente.

Em síntese, a integração de informações zootécnicas e econômicas por meio de um modelo estruturado e automatizado permite que suinocultores,

especialmente os independentes, tomem decisões estratégicas mais precisas sobre o momento de abate, contribuindo para a maximização da margem de contribuição e, conseqüentemente, para a sustentabilidade econômica da atividade.

5. Referências bibliográficas

- ALVES, Laya. *et al.*, Development of swine production cost calculation model. **Animals**. v. 12, n.17, 2022. <https://doi.org/10.3390/ani12172229>.
- BARCELLOS, Marcia *et al.* Pork consumption in Brazil: challenges and opportunities for the Brazilian pork production chain. **Journal on Chain and Network Science**, v. 11, n. 2, p. 99–114, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.3920/jcns2011.qpork3>.
- BERTOL, Teresinha; SANTOS FILHO, Jonas. Questões técnicas do peso de abate em suínos. Concórdia, SC. **Embrapa Suínos e Aves**. 2018. 105p.
- BOOTSTRAP. Bootstrap. Disponível em: <https://getbootstrap.com/> (acessado 22 setembro 2025).
- CEPEA/ESALQ – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Consultas ao banco de dados do site. Piracicaba, 2024. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/consultas-ao-banco-de-dados-do-site.aspx> (acessado 21 setembro 2025).
- CEPEA/ESALQ – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. SUÍNOS/CEPEA: Médias sobem por três meses consecutivos. 01 ago. 2014. Disponível em: <https://www.cepea.org.br/br/diarias-de-mercado/suinos-cepea-medias-sobem-por-tres-meses-consecutivos.aspx> (acessado 22 setembro 2025).
- CHART.JS. Chart.js. Disponível em: <https://www.chartjs.org> (acessado 22 setembro 2025).
- DJANGO PROJECT. Django. Disponível em: <https://www.djangoproject.com> (acessado 22 setembro 2025).
- HENCKE, Haroldo. Determinação do momento ótimo de venda de suínos empregando planilha eletrônica de cálculo. 2000. 93p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000.
- LACA, Emilio. Precision Livestock production: tools and concepts. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, p.123-132, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300014>.
- MIELE, Marcelo; ALMEIDA, Maxwell. Caracterização da suinocultura no Brasil a partir do Censo Agropecuário 2017 do IBGE. Concórdia, SC. **Embrapa**

Suíños e Aves, 2023. 33p. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca> (acessado 20 setembro 2025).

PADOVEZE, Clóvis Luís. Contabilidade de custos: teoria, prática, integração com sistemas de informação. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

PINHEIRO, Antônio; PROTAS, José; IRGANG, Renato. A função de produção e a relação de preços insumo-produto, como determinantes do peso ótimo de abate de suínos. **Revista de Economia Rural**, v. 21, n.3, p. 371-379. 1983.

PISSININ, Dejanir, PACHECO, Paulo; OLIVEIRA, Vladimir. (2025). Influence of Productive Performance on the Optimal Slaughter Weight of Pigs: An Approach Based on Contribution Margin. **Revista de Gestão Social e Ambiental** - RGSA, v. 19, n. 6, e012730. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n6-105>.

POMAR, Candido; Van MILGEN, Jacob; REMMUS, Aline. Precision livestock feeding, principle and practice. Poultry and pig nutrition, **Wageningen Academic Publishers**, 2019, 978-90-8686-333-4. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-884-1_18.

POSTGRESQL GLOBAL DEVELOPMENT GROUP. PostgreSQL: The world's most advanced open source relational database. Disponível em: <https://www.postgresql.org> (acessado 22 setembro 2025).

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Python. Disponível em: <https://www.python.org>. (acessado 22 setembro 2025).

ROCHA, Denis; MOURA, Altair; GIROTTO, Ademir. Análise de risco de sistemas de produção de suínos, integrado e independente, em períodos de alta e baixa rentabilidade. **Revista de Economia e Agronegócio**, v.5, n.3. p. 401-423. 2007. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.54593>

SANTOS FILHO, Jonas; BERTOL, Teresinha; COLDEBELLA, Arlei. Visão econômica do peso ótimo de abate. In: BERTOL, T. M., & SANTOS FILHO, J. I. (2018). Questões técnicas do peso de abate em suínos. Concórdia, SC. **Embrapa Suínos e Aves**. 2018. Cap. 4, p. 83-105. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1095646> (acessado 05 setembro 2025).

Autores

Dejanir Pissini¹, Marcos Luis Cassal¹, Paulo Santana Pacheco², Vladimir de Oliveira²

¹Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil,

²Departamento de Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil

CAPÍTULO 5

Tilapicultura: desafios, tendências e estratégias nutricionais sustentáveis

Gregorio Cargnin, Stéfane Sauzem Silva, Maurício Antônio Paz Martins, Diuly Bortoluzzi Falcone, Leila Picolli da Silva

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-39-8.c5>

Resumo

A aquicultura tem se consolidado como um dos setores que mais cresce no mundo, desempenhando papel fundamental na segurança alimentar e no fornecimento de proteína animal de qualidade. A tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*) destaca-se por sua adaptabilidade, rápido crescimento e eficiência alimentar, sendo atualmente a principal espécie de peixe criada no Brasil e a segunda mais produzida globalmente. Com a intensificação dos sistemas de produção, surgem desafios relacionados à sustentabilidade, ao manejo nutricional e aos custos de produção. A alimentação corresponde a mais de 75% dos custos totais de produção na aquicultura, e a elevada dependência de ingredientes convencionais, como farinha de peixe e farelo de soja, aliada às restrições no uso de antibióticos, tem estimulado a busca por fontes proteicas alternativas e por aditivos naturais capazes de promover o crescimento e a saúde dos peixes. O uso de subprodutos vegetais e compostos bioativos (como polifenóis, fibras e polissacarídeos não amiláceos solúveis) tem se mostrado uma estratégia promissora. Esses componentes podem contribuir para melhorar o desempenho produtivo, a integridade intestinal e a resposta imunológica dos peixes, além de reduzir impactos ambientais e agregar valor a resíduos agroindustriais. Assim, a nutrição funcional e o desenvolvimento de ingredientes sustentáveis se apresentam como caminhos essenciais para o fortalecimento e a inovação da tilapicultura moderna.

Palavras-chaves: bioativos, fontes proteicas, ingredientes alternativos, mercado aquícola, piscicultura, produção animal.

1. Introdução

A aquicultura surgiu como uma importante fonte de produção de alimentos, renda e subsistência, tornando-se um dos setores que mais crescem

no mundo nos últimos anos (Gandolpho *et al.*, 2025). A expansão e o fortalecimento do setor aquícola têm contribuído significativamente para a segurança alimentar e conseqüentemente, no aumento contínuo global do consumo *per capita* de pescado. Nesse cenário, algumas espécies de peixes, como a tilápia-do-Nilo, têm se destacado devido à facilidade de criação e alta demanda (Wang e Lu, 2016). Sua consistente evolução no mercado, reflete-se decisivamente na necessidade de produzir conhecimento inovador, garantindo que a expansão de seu cultivo esteja galgada em qualidade produtiva e responsabilidade ambiental.

Para que este comportamento de mercado continue ascendente, as pesquisas têm voltado especial interesse para o desenvolvimento de estudos sobre aspectos relacionados à nutrição da espécie, uma vez que as rações representam mais de 75% das despesas totais de produção em sistemas intensivos (Musa *et al.* 2025; Rossignoli *et al.*, 2023). Com o crescimento global do setor de aquicultura, o fornecimento de ingredientes essenciais para rações, como a farinha de peixe, tornou-se cada vez mais restrito (Cantillo e Deshpande, 2025; Fantatto *et al.*, 2024). Neste cenário, o uso de ingredientes vegetais nas dietas tem se tornado prática comum.

As fontes vegetais atualmente de maior disponibilidade no mercado são provenientes da soja (farelos e concentrados), as quais também são intensamente usadas nas dietas de outros animais de produção (ex. aves e suínos). Este fato demonstra que a crescente migração da aquicultura para uso dessas fontes proteicas, pode causar competição entre cadeias produtivas, levando à instabilidade de preços e ao aumento da pressão sobre o uso da terra e de insumos agrícolas. Portanto, estudos que abordem sua substituição por fontes alternativas em rações piscícolas, se tornam tão importantes quanto aqueles que buscam substituir fontes proteicas animais por vegetais.

Neste contexto, o objetivo da presente revisão de literatura é abordar o panorama atual sobre a produção de tilápia, seus desafios, tendências e inovações voltadas ao uso de ingredientes alternativos na elaboração de rações e seus reflexos sobre a saúde, metabolismo e desempenho zootécnico da espécie.

2. Características biológicas e produtivas da tilápia

As tilápias pertencem à ordem Perciformes e à família Cichlidae, originárias do continente africano. A partir da década de 1960, sua produção se expandiu globalmente, especialmente em regiões de clima tropical e subtropical. Trata-se de uma espécie altamente adaptável a diferentes condições ambientais e a diferentes sistemas de cultivo como tanques-rede, viveiros escavados e sistemas de recirculação, tolerando variações significativas de temperatura, salinidade e níveis de oxigênio dissolvido. No Brasil, a introdução das tilápias ocorreu na década de 1970, por meio da espécie *Oreochromis niloticus*, conhecida popularmente como tilápia-do-Nilo (Rodrigues *et al.*, 2013).

A tilápia-do-Nilo apresenta coloração acinzentada, corpo lateralmente comprimido e linha lateral dividida em dois segmentos, possui preferência por fitoplâncton, mas adapta-se facilmente a rações comerciais e artesanais, incluindo aquelas formuladas a partir de subprodutos agropecuários (Rodrigues *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2007)

Do ponto de vista reprodutivo, possui características que favorecem a produção em larga escala. Atinge a maturidade sexual precocemente, permitindo ciclos reprodutivos rápidos. Entretanto, essa alta taxa reprodutiva pode resultar em superpopulação nos tanques, afetando negativamente o desempenho zootécnico. Para contornar esse problema, é comum a aplicação de técnicas de reversão sexual, obtendo-se lotes monosexuais, geralmente compostos por machos, que apresentam crescimento mais rápido e melhor conversão alimentar, além de direcionar melhor os nutrientes ingeridos para o crescimento, já que as fêmeas destinam parte dos recursos à produção de gametas. Essa técnica contribui para prevenir a reprodução indesejada em cativeiros e reduzir o risco de introdução de espécies exóticas em reservatórios e corpos d'água naturais (Furuya, 2010; Rodrigues *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2007).

Do ponto de vista econômico e mercadológico, a carne branca, de sabor suave, baixa quantidade de gordura e poucas espinhas, é altamente apreciada pelos consumidores (Peixe BR, 2025). Além disso, a espécie apresenta uma conversão alimentar eficiente, com taxas que variam entre 1,2:1 e 1,8:1, dependendo do sistema de cultivo e da qualidade da ração utilizada (Oliveira *et al.*, 2007; Winckler *et al.*, 2024), podendo atingir um peso de abate entre 600 g e

1,2 kg em poucos meses, tornando a tilapicultura uma atividade de elevado potencial de retorno econômico (Bozano e Cyrino, 2020). Tais características favoreceram o desenvolvimento da tilapicultura, pois atraíram a atenção dos produtores e impulsionaram o comércio.

3. Panorama da tilapicultura no Brasil e no mundo

Nas últimas décadas, a aquicultura consolidou-se como o setor de produção animal de maior crescimento, superando as taxas de expansão observadas nas cadeias tradicionais de proteína, como frango, suínos e bovinos. Segundo a FAO (2024), a produção aquícola mundial atingiu 94,4 milhões de toneladas em 2022, ultrapassando, pela primeira vez, a pesca extrativista, que somou 92,3 milhões de toneladas no mesmo período. Com isso, a aquicultura passou a responder por mais da metade (51%) do pescado consumido globalmente, o que reforça sua importância para a segurança alimentar mundial.

Essa tendência reflete não apenas a capacidade da aquicultura de atender a crescente demanda global por proteína, mas também a pressão por sistemas produtivos mais eficientes e sustentáveis. A tilapicultura, em particular, destaca-se nesse contexto, pois representa a segunda espécie mais produzida no mundo (FAO, 2024), o que foi motivado pelo seu rápido crescimento e ampla adaptabilidade a distintos ambientes e dietas (Yang *et al.*, 2025)

A Ásia atualmente concentra mais de 70% da produção mundial, sendo a China o maior produtor global, seguida por países como Indonésia, Egito, Filipinas e Tailândia. De acordo com a FAO (2024), a produção mundial de tilápias ultrapassou 7 milhões de toneladas, representando uma das principais fontes de proteína animal. O cenário global indica a consolidação da tilápia como uma *commodity* aquícola, com crescente demanda por produtos processados, frescos e/ou com maior valor agregado.

O Brasil se destaca como o maior produtor da espécie fora do continente asiático, com volume aproximado de 662,230 mil toneladas, representando mais de 68% da produção aquícola nacional (Peixe BR, 2025). Os principais estados produtores são Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Bahia, que concentram os maiores polos de produção, principalmente em sistemas de

tanques-rede. Esses valores ficam explícitos no consumo de carne de peixe que teve um aumento significativo. De acordo com a FAO (2024), a demanda por pescado aumenta cerca de 1,5% ao ano, de modo que, atualmente, aproximadamente 17% da proteína animal consumida pela população mundial é proveniente de peixes.

4. Tendências de consumo e impacto na produção de tilápias

Conforme o relatório da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2024), a expansão populacional, o crescimento da renda e a concentração da população nas cidades, continuará promovendo elevação na demanda por alimentos nas próximas décadas, elevando a participação das proteínas para consumo humano e evidenciando a necessidade do aumento na produção de proteína animal.

Nesse sentido é esperado até 2030 crescimento de 37% no consumo, evidenciando a importância desse setor na geração de alimentos (FAO, 2018, 2020). Com este aumento expressivo do consumo, a pesca extrativista não será capaz de atender a demanda de forma sustentável, sendo assim, a aquicultura representa o caminho para disponibilizar ao mercado produtos de qualidade, com homogeneidade e oferta regular (FAO, 2020).

Atualmente, a criação de tilápia do Nilo tem despertado o interesse e a atenção de pesquisadores da área aquícola no sentido de desenvolver trabalhos que contribuam para o aprimoramento e a fixação dessa exploração como fonte rentável na produção animal. Sua produção quadruplicou na última década devido à facilidade de aquicultura, comercialização e preços de mercado estáveis (FAO, 2024).

5. Nutrição e inovação no cultivo intensivo de tilápias

Com a intensificação da produção, torna-se necessário a adoção de práticas adequadas de manejo alimentar, aliadas ao monitoramento constante da qualidade da água e a oferta de dietas balanceadas, contendo todos os nutrientes essenciais, de modo a atender às exigências proteicas, energéticas e de aminoácidos, garantindo crescimento eficiente, boa conversão alimentar e

qualidade do produto final. A integração desses fatores atua de forma sinérgica no desenvolvimento adequado dos animais, promovendo seu bem-estar e favorecendo sistemas produtivos *eco-friendly*.

Nas fases iniciais de desenvolvimento, as tilápias apresentam exigências proteicas elevadas, que diminuem gradativamente à medida que se desenvolvem e atingem o tamanho comercial desejado. A demanda por proteína bruta ideal varia entre 28% e 35%, dependendo do estágio de crescimento e do objetivo produtivo (Francis *et al.*, 2020). Aminoácidos essenciais, como lisina, metionina + cistina, treonina e triptofano, são determinantes para a taxa de crescimento, eficiência proteica e desempenho reprodutivo (Furuya; Cruz; Gatlin, 2023).

A utilização de fontes alternativas de proteína, associada à aplicação de tecnologias que reduzem fatores antinutricionais e aumentam a disponibilidade de nutrientes, para a substituição total ou parcial das tradicionais fontes proteicas, como farinha de peixe e farelo de soja, torna-se uma estratégia promissora, diante da necessidade de ampliar o leque de opções de fontes proteicas viáveis.

Devido a intensificação da produção, os peixes estão expostos a maiores níveis de estresse, o que pode comprometer as respostas imunológicas dos animais, tornando-os mais suscetíveis a doenças oportunistas (Figueiredo e Leal, 2008). Diante das restrições ao uso de antibióticos em sistemas aquícolas, cresce a necessidade de alternativas eficazes e ambientalmente seguras, o que tem impulsionado pesquisas voltadas à utilização de ingredientes bioativos na nutrição de peixes.

Compostos bioativos são substâncias presentes em pequenas quantidades em plantas e alimentos, como frutas, vegetais, nozes, óleos e grãos integrais, capazes de atuar como antioxidantes, antimicrobianos e moduladores da microbiota intestinal e do sistema imunológico, influenciando processos metabólicos e a saúde (Leyva-López *et al.*, 2020). Dessa forma, a nutrição de tilápias em sistemas intensivos demanda não apenas o equilíbrio entre proteína, energia e aminoácidos essenciais, mas também a incorporação de estratégias inovadoras, como o uso de ingredientes alternativos e bioativos, que favoreçam o desempenho zootécnico, a saúde dos animais e a sustentabilidade do cultivo.

5.1. Fontes proteicas e seu uso na nutrição de peixes

Quando se trata da nutrição de peixes, é imprescindível destacar que as exigências proteicas variam de acordo com o hábito alimentar da espécie produzida, sendo consideradas elevadas para espécies atualmente mais produzidas, com níveis de inclusão acima de 28%. Esse fato, acaba aumentando a dependência pelo uso de fontes proteicas de origem animal, que representa mais de 50% do custo da alimentação (Lazzari e Baldisserotto, 2018; Santos *et al.*, 2019;).

Para uso na produção de rações para peixes, a fração proteica pode vir tanto de fontes animais como vegetais. As fontes proteicas de origem animal mais comumente utilizadas são as farinhas de peixe e de carnes (Moro e Rodrigues, 2015). Já para as de origem vegetal, as mais utilizadas são os farelos e concentrados proteicos de soja, farelo de canola e farelo de algodão.

5.2. Fontes alternativas de proteína

A dependência exacerbada por uma única fonte proteica, coloca em risco a estabilidade produtiva, caso algum evento inesperado afete esta cultura. Dessa forma, ter outras opções de ingredientes proteicos se torna imprescindível. Preferencialmente, as alternativas devem garantir oferta de mercado, baixa variabilidade em seu perfil nutricional e pouca flutuação de preços ao longo do ano.

Aliado a estes pontos, as fontes vegetais são preferidas, pois possibilitam formulações de rações “verdes”, fato que tem assumido importância considerável na escolha de produtos pelo mercado consumidor nos últimos anos (Tansaz *et al.*, 2018). Contudo, devemos lembrar que a maior parte das fontes proteicas vegetais produzidas atualmente tem fatores antinutricionais associados, o que limita sua utilização.

Nesta realidade, deve-se considerar a utilização de estratégias tecnológicas para concentração da fração proteica, otimizando a qualidade nutricional destas fontes (Fries *et al.*, 2011; Pianesso, 2018). Os processos para concentração proteica vegetal baseiam-se na aplicação de tratamentos físicos, térmicos, químicos e enzimáticos, que podem ser usados de forma individual ou

combinada, visando maior eficiência quali-quantitativa na obtenção do produto final. Além disso, com adequado direcionamento tecnológico, muitos coprodutos, resíduos e subprodutos das indústrias de alimentos tornam-se potenciais matérias primas para a concentração de proteínas, o que traz impactos positivos para redução de desperdício, mitigação de impactos ambientais e fortalecimento de cadeias produtivas.

Como foi investido em tecnologias para fazer o concentrado de soja, podia-se também ser investido em pesquisas e uso de tecnologias para outras fontes vegetais não concorrentes com cadeias da nutrição animal que a soja compete, além de retirar residuais que ficam sem destino, podendo ter um uso na nutrição não poluindo o meio ambiente (Coêlho, 2018). Outro aspecto relevante refere-se ao desenvolvimento de tecnologias que viabilizem a utilização de aditivos na nutrição de peixes, especialmente aqueles obtidos a partir de coprodutos da indústria. Essa abordagem favorece o aproveitamento integral da matéria-prima e possibilita a reinserção de produtos de valor agregado no mercado.

5.3. Papel dos aditivos bioativos

Um dos fatores que têm impulsionado o avanço da tilapicultura é o uso crescente de aditivos bioativos na alimentação dos peixes. Esses aditivos compreendem substâncias naturais ou sintéticas que, adicionadas em pequenas quantidades às dietas, exercem efeitos benéficos sobre a saúde, o desempenho zootécnico e a eficiência produtiva dos animais.

Entre as principais classes de aditivos bioativos estão os compostos fenólicos, como flavonoides e taninos, de reconhecida ação antioxidante e antimicrobiana (Albuquerque *et al.*, 2021), os polissacarídeos não amiláceos solúveis, como β -glucanas, pectinas e gomas vegetais, com efeito imunomodulador e prebiótico (Adorian *et al.*, 2015, 2019, 2021; Goulart *et al.*, 2015, 2017, 2018), os óleos essenciais, com efeito antibacterianos e imunoestimulatórios (Juarez *et al.*, 2023) e extratos vegetais (El-Sayed *et al.*, 2024), além de probióticos, prebióticos e simbióticos (Mugwanya *et al.*, 2022).

A aplicação desses compostos na nutrição de peixes tem mostrado resultados positivos em parâmetros como taxa de crescimento e eficiência alimentar (Rohani *et al.*, 2022), mucosa intestinal (Adorian *et al.* 2016, 2020), imunidade e indicadores de estresse oxidativo (Rezende *et al.*, 2021) e a sustentabilidade, pois a utilização de subprodutos agroindustriais como fontes de compostos bioativos, como por exemplo, o bagaço de oliva, o farelo de uva, a linhaça e cascas de frutas cítricas, não apenas agrega valor a resíduos agrícolas, reduzindo custos de produção e impactos ambientais (López *et al.*, 2020).

O avanço das pesquisas sobre nutrição funcional e a aplicação prática desses aditivos em larga escala têm sido determinantes para a expansão sustentável da piscicultura, permitindo reduzir os impactos ambientais da produção e atender às exigências de um mercado consumidor cada vez mais atento à qualidade e à segurança alimentar. Os aditivos bioativos deixaram de ser apenas um recurso complementar e passaram a ocupar um lugar estratégico nas formulações nutricionais, contribuindo diretamente para o aumento da produtividade, redução de custos com tratamentos veterinários e melhoria da rentabilidade dos sistemas aquícolas.

6. Considerações finais

Diante do exposto, destaca-se a importância da tilápia-do-Nilo na produção aquícola. No entanto, para dar continuidade a esse crescimento, se faz necessário ampliar os estudos voltados à identificação de potenciais fontes proteicas que possam substituir os ingredientes convencionais, visando uma produção mais *eco-friendly*. Além disso, é necessário o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias que otimizem o aproveitamento dos ingredientes nas dietas, favorecendo a eficiência nutricional e o desempenho zootécnico dos peixes.

7. Referências bibliográficas

ADORIAN, Taida *et al.* Effect of different dietary fiber concentrates on the metabolism and indirect immune response in silver catfish. **Animal Feed**

- Science and Technology**, v. 215, p. 124–132, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.03.001>.
- ADORIAN, Taida *et al.* Evaluation of immune response and performance of silver catfish fed functional linseed fibres in response to hypoxia stress. **Aquaculture Research**, v. 50, n. 10, p. 3060–3069, 2019. <https://doi.org/10.1111/are.14266>.
- ADORIAN, Taida *et al.* Functional linseed fibres and their impacts on silver catfish (*Rhamdia quelen*) nutrition. **Aquaculture Nutrition**, v. 26, n. 5, p. 1647–1656, 2020. <https://doi.org/10.1111/anu.13110>.
- ADORIAN, Taida *et al.* Dietary fiber in the nutrition of silver catfish: Prebiotic or antinutrient? **Animal Feed Science and Technology**, v. 209, p. 167–173, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.07.017>.
- ADORIAN, Taida *et al.* Fractionation of linseed and obtaining ingredients rich in protein and fibers: alternatives for animal feed. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 102, p. 1514–1521, 2021. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11486>.
- ALBUQUERQUE, Bianca. *et al.* Phenolic compounds: current industrial applications, limitations and future challenges. **Food Function**, v. 7, p. 14–29, 2021. <https://doi.org/10.1039/D0fo02324h>.
- BOZANO, Gustavo; CYRINO, José. Peso ótimo de abate de peixes em função do mercado, custos, rendimentos de produção e do processamento: o caso da tilápia. **Revista Estratégias e Soluções**, v. 2, 2021. <https://doi.org/10.22167/2675-6528-20210006>.
- CANTILLO, Javier; DESHPANDE, Paritosh. Carbon footprint of alternative protein sources for Atlantic salmon (*Salmo salar*) aquaculture: A two-step systematic literature review. **Aquaculture Reports**, v. 40, p. 1–26, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102601>.
- COÊLHO, Jackson Dantas. Produção de grãos: feijão, milho e soja. Caderno Setorial ETENE. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 3, n.51, nov. 2018. <https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/3016> (acessado 04 outubro 2025).
- EL-SAYED, Abdel-Fattah *et al.* Dietary Effect of a Plant-Based Mixture (Phyto AquaMeric) on Growth Performance, Biochemical Analysis, Intestinal Histology, Gene Expression and Environmental Parameters of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Fishes**, v. 9, p. 358, 2024. <https://doi.org/10.3390/fishes9090358>.
- FANTATTO, Rafaela *et al.* Exploring sustainable alternatives in aquaculture feeding: The role of insects. **Aquaculture Reports**, v. 37, p. 1–13, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102228>.
- FAO - Food And Agriculture Organization Of United Nations. O Estado da Pesca e Aquicultura Mundial 2018: Meeting the sustainable development goals.

- Rome**, 2018. <http://www.fao.org/3/i9540en/i9540en.pdf>. (acessado 15 setembro 2025).
- FAO - Food And Agriculture Organization Of United Nations. O estado da Pesca e Aquicultura Mundial em 2020: Sustainability in Action. **Roma**, 2020. <http://www.fao.org/3/ca9229en/CA9229EN.pdf> (acessado 15 setembro 2025).
- FAO. 2024. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Informe da FAO: Tilapia**. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/7e605894-bca8-42fa-abbc-d7d5890cff9b/> (acessado 14 setembro 2025).
- FIGUEIREDO, Henrique; LEAL, Carlos. Technologies applied to fish health. **Brazilian Journal of Animal Science**, v. 37, p. 8-14, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008001300002>.
- FRANCIS, G. *et al.* Nutritional requirements and feed formulation for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Aquaculture Research**, v. 51, n. 2, p. 567–582, 2020. <https://www.scielo.br/j/cta/a/7C8QH9brkD8P38nq4JCrKVp/?lang=en&format=pdf> (acessado 23 setembro 2025).
- FRIES, Edionei *et al.* Hidrolisados cárneos proteicos em rações para alevinos de kinguio (*Carassius auratus*). **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 37, n. 4, p. 401-407, 2011. <https://institutodepesca.org/index.php/bip/article/download/936/917/3299> (acessado 28 agosto 2025).
- FURUYA, W. M. *et al.* Tabelas brasileiras para a nutrição de tilápias. Toledo, PR: GFM Gráfica e Editora Ltda., 2010. 100 p. ISBN 978-85-60308-14-9. https://www2.uepg.br/bacharelado-zootecnia/wp-content/uploads/sites/98/2021/04/Tabelas_Brasileiras_Tilapias.pdf (acessado 25 agosto 2025).
- FURUYA, Wilson *et al.* Amino acid requirements for Nile tilapia: an update. **Animals**, v. 13, n. 5, p. 900, 2023. <https://doi.org/10.3390/ani13050900>.
- GANDOLPHO, Bianca *et al.* Supplementing the diet of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) with trub, a brewing byproduct, enhanced growth performance, increased fillet protein content, improved immunological response, and lowered intestinal pH. **Animal Feed Science and Technology**, v. 327, p. 1-11, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2025.116444>.
- GOULART, Fernanda *et al.* Effect of dietary fiber concentrates on growth performance, gut morphology and hepatic metabolic intermediates in jundiá (*Rhamdia quelen*). **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 70, n. 05, p. 1633-1640, 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-10218>.
- GOULART, Fernanda. Effects of Dietary Fibre Concentrates on growth performance and digestive enzyme activities of jundiá (*Rhamdia quelen*).

- Aquaculture Nutrition**, v. 23, p. 358-366, 2015. <https://doi.org/10.1111/anu.12400>.
- GOULART, Fernanda *et al.* Effect of supplementation of dietary fibre concentrates on biochemical parameters, stress response, immune response and skin mucus of jundiá (*Rhamdia quelen*). **Aquaculture Nutrition**, v. 24, p. 375-382, 2017. <https://doi.org/10.1111/anu.12568>.
- JUAREZ, Jesús *et al.* Microencapsulated essential oils influence the growth and foregut histomorphometry of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings. **Veterinary and Animal Science**, v. 22, p. 100-316. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2023.100316>.
- LAZZARI, Rafael; BALDISSEROTTO, Bernardo. Excreção de nitrogênio e fósforo em pisciculturas. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 34, n. 4, p. 591-600, 2018. <https://www.researchgate.net/publication/284425485> (acessado 17 setembro 2025).
- LÓPEZ, Nayely *et al.* Exploitation of Agro-Industrial Waste as Potential Source of Bioactive Compounds for **Aquaculture**. **Foods**, v. 9, p. 1-22. <https://doi.org/10.3390/foods9070843>.
- MORO, Giovanni; RODRIGUES, Ana Paula. Rações para organismos aquáticos: tipos e formas de processamento. **Embrapa Pesca e Aquicultura- Documentos** (INFOTECA-E), 1 ed. 2015. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/125393/1/SD14.pdf> (acessado 09 setembro 2025).
- MUGWANYA, Muziri *et al.* Updating the Role of Probiotics, Prebiotics, and Synbiotics for Tilapia Aquaculture as Leading Candidates for Food Sustainability: a Review. **Probiotics & Antimicro. Prot.**, v. 14, p. 130–157. 2022. <https://doi.org/10.1007/s12602-021-09852-x>.
- MUSA, Safira *et al.* The Influence of Various Feeding and Pond Fertilization Strategies on Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) Production and the Selectivity for Natural versus Supplementary Diet in Semi-Intensive Aquaculture Systems. **Aquaculture, Fish and Fisheries**, v. 5, p. 1-16, 2025. <https://doi.org/10.1002/aff2.70031>.
- OLIVEIRA, Elenise *et al.* Produção de tilápia: Mercado, espécie, biologia e recria. **Embrapa. Circular Técnica**, n. 45. 2007. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/69806/1/Circular45.pdf> (acessado 10 setembro 2025).
- PEIXE BR – Associação Brasileira Da Piscicultura. Anuário Peixe BR da Piscicultura 2025. São Paulo: Peixe BR, 2025. <https://m.efeedlink.com/contents/04-07-2025/1572850b-593f-471e-97ed-f6a8de713ed6-1201.html> (acessado 15 setembro. 2025).
- PIANESSO, Dirleise. Obtenção do concentrado proteico de linhaça e sua aplicação na nutrição do jundiá. 2018. 122 f. Tese (Doutorado em Zootecnia)

- Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2018. <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/15646> (acessado 19 set. 2025).
- REZENDE, Renata *et al.* Phytobiotics blend as a dietary supplement for Nile tilapia health improvement. **Fish Shellfish Immunol**, v. 114, p. 293-300. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2021.05.010>.
- RODRIGUES, Ana Paula *et al.* Piscicultura de água doce: multiplicando conhecimentos. Brasília, DF: Embrapa, p. 440, 2013. ISBN 978-85-7035-272-9. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1082280> (acessado 18 setembro 2025).
- ROHANI, Md Fazle. *et al.* Probiotics, prebiotics and synbiotics improved the functionality of aquafeed: Upgrading growth, reproduction, immunity and disease resistance in fish. **Fish Shellfish Immunol**, v. 120, p. 569-589, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2021.12.037>.
- ROSSIGNOLI, Cristiano *et al.* Tilapia aquaculture systems in Egypt: Characteristics, sustainability outcomes and entry points for sustainable/aquatic food systems. **Aquaculture**, v. 577, p. 1-15, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739952>.
- TANSAZ, Samira *et al.* Soy protein isolate/bioactive glass composite membranes: Processing and properties. **European Polymer Journal**, v. 106, p. 232-241, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.07.003>.
- WANG, Miao; LU, Maixin. Tilapia polyculture: a global review. **Aquaculture Research**, v. 47, p. 2363-2374, 2016. <https://doi.org/10.1111/are.12708>.
- WINCKLER, Lilian *et al.* Recria de tilápias (*Oreochromis niloticus*) em sistemas de recirculação de água em propriedade familiar na região subtropical. Embrapa Clima Temperado. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, n. 378. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2024. 10 p. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1169178/1/Boletim-378-Recria-de-tilapias-Oreochromis-niloticus-em-sistemas-de-recirculacao-de-agua-em-propriedade-familiar.pdf> (acessado 15 setembro 2025).
- YANG, Hang *et al.* AI-driven aquaculture: A review of technological innovations and their sustainable impacts. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 15, p. 508-525, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2025.01.012>.

Autores

Gregorio Cargnin, Stéfane Sauzem Silva, Maurício Antônio Paz Martins, Diuly Bortoluzzi Falcone, Leila Picolli da Silva

Departamento de Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

CAPÍTULO 6

Uso de tecnologia portátil com inteligência artificial para análise de qualidade do leite diretamente em campo

Paola O. Selau, Francine B. Facco, Monique de L. Antunes, Nathália M. Veronezi, Andrieli Stefanello, Renan Cecchin, Pamela I. Otto, Julio Viégas

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-39-8.c6>

Resumo

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) portátil surge como uma ferramenta inovadora para avaliação da qualidade do leite, permitindo análises rápidas, não destrutivas e aplicáveis diretamente em campo. Essa tecnologia apresenta grande potencial para monitoramento contínuo e suporte à tomada de decisão na produção leiteira. Este estudo teve por objetivo avaliar o desempenho de sensores NIRS portáteis na análise da qualidade do leite em condições de campo. Foram coletadas 219 amostras de leite de sete mesorregiões do Rio Grande do Sul, que, após aumento artificial de dados, totalizaram 647 amostras utilizadas para treinamento, validação e teste de modelos preditivos baseados em redes neurais. Os sensores avaliados foram os equipamentos portáteis A32R024, A32R019 e A32R026. Os resultados indicaram boa capacidade preditiva para gordura e sólidos totais ($R^2 = 0,68 - 0,90$; RMSEP = $0,40 - 0,67$), desempenho moderado para proteína, N-ureico e extrato seco desengordurado (ESD) ($R^2 = 0,19 - 0,60$; RMSEP = $0,29 - 0,40$) e predição limitada para lactose (R^2 variando de $0,04 - 0,17$; RMSEP = $0,19 - 0,21$). Apesar das limitações da tecnologia portátil, estratégias como aumento do número de amostras, uso de algoritmos mais robustos e avaliação de diferentes dispositivos podem aprimorar a acurácia e a capacidade discriminatória dos modelos. Conclui-se que os sensores NIRS portáteis representam ferramenta promissora para triagem rápida e monitoramento em tempo real da qualidade do leite, embora não substituam métodos laboratoriais de referência para análises de alta precisão.

Palavras-chave: gordura, lactose, monitoramento, NIR, proteína, sólidos totais.

1. Introdução

O monitoramento da qualidade do leite é de grande relevância para a cadeia produtiva, uma vez que a composição e os parâmetros físico-químicos refletem não apenas o valor nutricional do produto, mas também o estado de saúde dos animais, o manejo alimentar e as condições higiênico-sanitárias da ordenha (Hanuš *et al.*, 2018; Walstra *et al.*, 2005). Métodos convencionais de análise são considerados de referência, porém demandam maior tempo, infraestrutura laboratorial e custos elevados, o que pode limitar sua aplicação rotineira em larga escala (Santos *et al.*, 2021). O impacto econômico da qualidade do leite pode ser dimensionado pelo volume produzido e comercializado nacionalmente, que atingiu um recorde histórico de 6,49 bilhões de litros de leite cru, resfriado ou não, industrializados no Brasil, conforme pesquisa realizada no primeiro trimestre do ano pelo IBGE, divulgada em setembro de 2025.

Nesse contexto, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) desponta como uma alternativa promissora, pois possibilita análises rápidas, não destrutivas e simultâneas de múltiplos constituintes, sem necessidade de preparo complexo da amostra ou uso de reagentes químicos (Ciurczak *et al.*, 2014). A tecnologia do NIR se baseia na absorção por radiação eletromagnética por ligações moleculares, gerando espectros característicos que refletem a composição química do material analisado. O uso de modelos quimiométricos robustos permite a correlação entre os espectros obtidos e parâmetros de referência, resultando em metodologias preditivas aplicáveis a diferentes matrizes, incluindo o leite cru (Tsenkova *et al.*, 1999; Berzaghi e Riovanto, 2009), favorecendo o monitoramento em tempo real da qualidade do produto e a tomada de decisão na bovinocultura leiteira.

Embora os NIR de bancada apresentem alta precisão e já sejam consolidados para análises de leite em laboratórios, os avanços tecnológicos em microeletrônica e óptica viabilizaram o desenvolvimento de dispositivos portáteis, capazes de levar a técnica diretamente ao campo (Pu *et al.*, 2021; Beć *et al.*, 2022). Esses sensores de NIR menores e mais acessíveis, têm mostrado potencial para a predição de componentes como gordura, proteína, lactose e sólidos totais, ainda que sua performance varie conforme o modelo e/ou

fabricante, o intervalo espectral e a qualidade da calibração utilizada (De la Roza-Delgado *et al.*, 2017; Guerra *et al.*, 2024).

Estudos recentes (Khan *et al.*, 2024) indicam que, apesar das vantagens de agilidade e praticidade, a robustez dos modelos preditivos em NIR portátil pode ser limitada por fatores como variações de temperatura e umidade do ambiente, heterogeneidade da composição do leite, diferenças de matriz e faixa espectral restrita de alguns sensores. Para minimizar esses efeitos, calibrações regionais, modelos de correção de variabilidade e manutenção periódica dos equipamentos são estratégias recomendadas. Assim, a validação desses equipamentos em condições reais de campo é fundamental para confirmar sua aplicabilidade prática na pecuária leiteira.

Com base nas informações reportadas, a aplicação da tecnologia NIRS portátil em análises de qualidade do leite ainda é pouco explorada no Brasil, evidenciando a necessidade de pesquisas que confirmem a eficiência da tecnologia na prática. Portanto, este capítulo objetiva avaliar a qualidade do leite cru em condições de campo, utilizando um sensor de infravermelho próximo portátil.

2. Espectroscopia Do Infravermelho Próximo (Nirs)

O NIRS é uma técnica analítica baseada na interação da radiação eletromagnética com a matéria, amplamente utilizada para análises qualitativas e quantitativas em diversas áreas, incluindo agricultura, indústria alimentícia, farmacêutica e medicina. O NIR está compreendido, especificamente, em uma faixa de comprimento de onda entre 780 e 2.500 nanômetros, situada entre a luz visível e o infravermelho médio no espectro eletromagnético (Vincent *et al.*, 2020).

O princípio fundamental do NIR baseia-se na absorção de radiação por ligações moleculares como C-H, O-H, N-H e S-H, presentes em compostos orgânicos. Quando a luz incide sobre uma amostra, essas ligações vibram em modos específicos, resultando em espectros característicos que podem ser correlacionados com propriedades físico-químicas da amostra (Osborne *et al.*, 1993).

Além disso, a eficácia do NIRS está intimamente ligada ao uso de métodos quimiométricos, que permitem a construção de modelos preditivos robustos a partir dos espectros obtidos. Tais modelos são desenvolvidos com base em calibrações estatísticas que correlacionam os dados espectrais com análises de referência, possibilitando a estimativa simultânea de múltiplos constituintes com agilidade, precisão e sem a necessidade de reagentes químicos. A combinação entre a rapidez da aquisição espectral, a não destrutividade das amostras e a capacidade de análise de multicomponentes torna o NIRS uma ferramenta altamente atrativa para aplicações em rotinas laboratoriais e monitoramento em tempo real de processos produtivos (Ciurczak *et al.*, 2014).

2.1. Avanços tecnológicos em NIR portátil

O NIR consolidou-se ao longo das últimas décadas como uma ferramenta analítica poderosa e versátil na ciência animal e na indústria de laticínios, inicialmente com o uso de equipamentos de bancada (Berzaghi e Riovanto, 2009). Estudos pioneiros demonstraram a capacidade do NIR de bancada para quantificar não apenas os macrocomponentes do leite, como gordura, proteína e lactose, mas também indicadores de qualidade e saúde do rebanho, incluindo a contagem de células somáticas (CCS) (Tsenkova *et al.*, 1999).

Revisões subsequentes destacaram o potencial do NIR, juntamente com outras tecnologias de sensores, para o monitoramento da qualidade do leite, embora desafios relacionados à robustez, calibração e custo sejam reconhecidos (Brandt *et al.*, 2010). Avanços significativos em miniaturização de componentes ópticos e eletrônicos impulsionaram o desenvolvimento de espectrômetros NIRS portáteis, prometendo levar as vantagens da análise NIRS – rapidez, não destrutividade e ausência de reagentes químicos – diretamente para o campo (Berzaghi e Riovanto, 2009; Pu *et al.*, 2021). Os espectrômetros NIRS portáteis e de bancada diferem principalmente em termos de tamanho, robustez, capacidade analítica e aplicação no campo.

Enquanto os dispositivos de bancada são geralmente maiores, com maior capacidade de processamento e armazenamento de dados, os modelos

portáteis são mais compactos, leves e otimizados para uso direto em campo, facilitando medições rápidas e operadas com uma mão (Cen e He, 2007). Os portáteis costumam ter menor faixa espectral e resolução em comparação com os dispositivos de bancada, ainda assim fornecem resultados confiáveis para aplicações específicas, como a análise de alimentos, forragens e produtos agrícolas (Beć *et al.*, 2022).

Uma das aplicações primárias do NIRS portátil na qualidade do leite é a análise de composição. Diversos estudos avaliaram o desempenho de dispositivos portáteis, incluindo tecnologias como SCiO, NeoSpectra, MEMS FPI, MicroPhazir, na predição de gordura, proteína, lactose e sólidos não gordurosos (SNG) em leite cru. Os resultados indicam que muitos dispositivos portáteis podem fornecer predições adequadas para gordura e, em alguns casos, para proteína e SNG, com desempenho próximo aos padrões de referência, adequado para triagem ou monitoramento (De la Roza-Delgado *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2023; Guerra *et al.*, 2024). No entanto, a precisão pode variar significativamente dependendo do parâmetro, do tipo de sensor e do intervalo espectral utilizado.

A predição de lactose, por exemplo, mostrou-se desafiadora para alguns microssensores (Khan *et al.*, 2024), enquanto outros dispositivos de bolso (pocket-sized) apresentaram desempenho inadequado para lactose, CCS e ureia (Guerra *et al.*, 2024). Analitos como lactose e ureia apresentam bandas de absorção relativamente fracas ou sobrepostas no espectro NIR, dificultando sua identificação precisa, especialmente em dispositivos com baixa resolução espectral e relação sinal-ruído reduzida (Khan *et al.*, 2024).

Muitos desses sensores compactos operam em faixas espectrais restritas, como 740–1070 nm, o que limita a captação de regiões críticas associadas a certos compostos, como as bandas próximas a 1460 nm e 1900–2100 nm (Guerra *et al.*, 2024). No caso da CCS, a predição é ainda mais complexa, pois envolve características físicas e celulares que requerem calibrações indiretas, fortemente dependentes da qualidade do banco de dados e da robustez estatística dos modelos utilizados.

Além da composição básica, o NIR portátil tem sido explorado para detecção de adulterações do leite. Embora estudos mais antigos sobre detecção

de adulterantes específicos (como melamina) tenham utilizado NIR de bancada (Haughey *et al.*, 2015; Su *et al.*, 2018), a capacidade dos dispositivos portáteis para detectar desvios espectrais indica que também pode ser aplicado na detecção de não conformidades ou adulterações grosseiras em campo.

A implementação bem-sucedida do NIRS portátil em campo depende crucialmente de estratégias de calibração robustas e da capacidade de transferência de calibração entre diferentes unidades do mesmo modelo de instrumento (De la Roza-Delgado *et al.*, 2017). A variabilidade inerente aos espectros de produtos lácteos, influenciada por fatores como dia de análise, origem e processamento, precisa ser adequadamente modelada (Harnly *et al.*, 2014). Além disso, o preparo da amostra, embora simplificado em comparação com métodos úmidos, continua sendo um ponto crítico para garantir a representatividade e a precisão das medições em campo (Retsch, 2011).

Apesar dos avanços promissores, os desafios persistem. A precisão dos dispositivos portáteis, especialmente os de baixo custo ou baseados em novas tecnologias de micro sensores, ainda pode ser inferior à dos equipamentos de bancada ou métodos de referência para certos parâmetros (Guerra *et al.*, 2024; Khan *et al.*, 2024). A robustez dos modelos de calibração frente às variações ambientais (temperatura, umidade) e da matriz do leite (raça, dieta, estágio de lactação) em condições de campo requer validação contínua, e a padronização entre diferentes instrumentos e a transferência eficaz de calibrações são essenciais para a adoção em larga escala (De la Roza-Delgado *et al.*, 2017; Pu *et al.*, 2021).

2.2. Validação e desempenho do NIR portátil

A validação de dispositivos portáteis com a técnica NIRS para análise da qualidade do leite é etapa fundamental para assegurar sua aplicabilidade prática, especialmente em condições de campo. O desempenho analítico do NIRS portátil deve ser avaliado com base em critérios estatísticos robustos, como coeficiente de determinação (R^2), erro padrão de calibração (SEC), erro padrão de validação cruzada (SECV) e o coeficiente de correlação entre os valores preditos e os valores reais (r).

Estudos recentes têm demonstrado que para componentes como gordura, proteína e lactose, os equipamentos portáteis apresentam R^2 superiores a 0,90, indicando alto potencial preditivo em situações operacionais (Riu *et al.*, 2020; Guerra *et al.*, 2024; Pu *et al.*, 2021). A capacidade de predição, no entanto, depende da construção de modelos de calibração específicos para a matriz do leite, levando em consideração fatores como variações entre raças, estágio de lactação, manejo alimentar e sazonalidade. Para tal, modelos desenvolvidos a partir de amostras representativas e com ampla variabilidade composicional são mais robustos e transferíveis entre rebanhos (Rego *et al.*, 2020).

2.3. Aplicações do NIR portátil na qualidade do leite

Desde a década de 1960, estudos têm sido realizados utilizando espectroscopia de infravermelho aplicada à indústria alimentícia (Luiz *et al.* 2018). Contudo, nos últimos anos, o NIR portátil tem se destacado como uma ferramenta promissora para a avaliação da qualidade do leite diretamente no campo. Sua aplicação permite análises rápidas e não destrutivas de componentes nutricionais, como gordura, proteína e sólidos totais, facilitando o monitoramento em tempo real da produção leiteira.

Estudos recentes demonstram a eficácia de dispositivos NIR portáteis na predição de características do leite, uma pesquisa realizada por Guerra *et al.*, (2024) avaliou a viabilidade de espectrofotômetros NIRS de bolso para prever a qualidade do leite, utilizando 331 amostras individuais de leite de diferentes raças e rebanhos. Os resultados revelaram que o modelo de predição de teor de gordura foi adequado para controle de qualidade, com um R^2 de 0,93 e um RPD de 3,73. Modelos de predição para proteína, caseína e a razão gordura/proteína também apresentaram desempenho satisfatório, com R^2 superiores a 0,70 e RPD superiores a 1,73, sendo úteis para triagens preliminares. No entanto, a predição de outros componentes, como lactose, contagem de CCS, ureia e ponto de congelamento, apresentou desempenho inferior, indicando limitações na faixa espectral utilizada.

Além disso, a aplicação de sensores NIR portáteis permite a análise instantânea da composição do leite em amostras individuais, eliminando a

necessidade de envio ao laboratório e reduzindo significativamente o tempo de obtenção de resultados. Essa abordagem possibilita a identificação de variações na qualidade do leite de vacas individuais, permitindo ajustes nutricionais específicos para corrigir deficiências na composição do leite, no entanto, suas principais desvantagens são a presença da enorme banda de absorção de água, uma vez que o leite consiste em cerca de 87% de água.

3. Material e Métodos

Foram coletadas 219 amostras de leite em sete mesorregiões do Rio Grande do Sul: 1) Região Centro- Ocidental (Santa Maria, Santiago, São Gabriel, Caçapava do Sul, Alegrete, Rosário do Sul, Itaqui, São Vicente do Sul); 2) Região Centro-Oriental (Cachoeira do Sul, Santa Cruz do Sul, Lajeado, Estrela, Encantado); 3) Região Metropolitana (Porto Alegre, Canoas, Novo Hamburgo, Gravataí); 4) Região Noroeste (Passo Fundo, Erechim, Ijuí, Cruz Alta, Palmeira das Missões); 5) Região Nordeste (Caxias do Sul, Bento Gonçalves, Garibaldi, Flores da Cunha, Farroupilha); 6) Região Sudeste (Pelotas, Rio Grande, Bagé, Santana do Livramento) e 7) Região Sudoeste (Uruguaiana, Quaraí, Alegrete, Itaqui, São Borja).

As amostras de leite foram coletadas com coletores individuais de cada animal, em condições de campo. Na etapa de coleta do leite, foram coletados dois frascos da mesma amostra: um frasco (50 ml) de amostra foi utilizado para analisar em 3 sensores portáteis (NIRS) e o outro frasco (50 ml) foi destinado ao Laboratório de prestação de serviços analíticos da Univates (Universidade do Vale do Taquari), localizado em Lajeado, Rio Grande do Sul, para a obtenção dos valores de referência pelo método citometria de fluxo (ISO 13366-2 | IDF148-2:2006, CCS). Além das amostras do treinamento, algoritmos de aumento de dados foram aplicados para aumentar artificialmente o tamanho do conjunto de dados, resultando em 647 amostras. Destas, 65 amostras foram destinadas à validação e outras 65 ao teste.

O modelo foi treinado utilizando rede neural, com a arquitetura baseada em uma adaptação do SpectraNet. A avaliação do modelo foi realizada através do conjunto de testes em três equipamentos (A32R024, A32R019 e A32R026),

considerando métricas como coeficiente de determinação (R^2), raiz do erro quadrático médio (RMSE), média do erro absoluto (MAE), erros máximos e mínimos.

4. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos pelos três sensores portáteis mostraram diferenças consideráveis na capacidade preditiva do modelo de rede neural. Para determinação dos teores de gordura (Tabela 1) os R^2 tiveram boa capacidade preditiva: no equipamento A32R024, $R^2 = 0,71$; no A32R019, $R^2 = 0,90$; e no A32R026, $R^2 = 0,68$; indicando boa capacidade preditiva. O RMSEP* foi de 0,62, 0,40 e 0,62, respectivamente, enquanto o MAE variou de 0,28 a 0,47. Quanto aos erros extremos, o erro máximo variou de 0,78 a 1,36, e o erro mínimo entre -1,17 a -0,98.

Tabela 1. Resultados da predição de gordura no leite por espectroscopia NIR portátil

Equipamentos					
A32R024		A32R019		A32R026	
R^2	0,71	R^2	0,90	R^2	0,68
RMSEP*	0,62	RMSEP*	0,40	RMSEP*	0,62
MAE	0,47	MAE	0,29	MAE	0,43
Assertividade*	82,66	Assertividade*	89,74	Assertividade*	82,95
Erro Máximo	1,36	Erro Máximo	0,78	Erro Máximo	1,59
Erro Mínimo	-0,99	Erro Mínimo	-1,17	Erro Mínimo	-0,98

Legenda: R^2 – Coeficiente de determinação; RMSEP* – Raiz do erro quadrático médio de predição; Média erro absoluto (MAE); Assertividade* – Percentual de acertos dentro do intervalo de confiança definido; Erro Máximo – Maior valor de erro observado; Erro Mínimo – Menor valor de erro observado; Erro Absoluto – Diferença absoluta entre o valor observado e o predito.

Esses valores sugerem boa precisão do modelo para a predição de gordura, com menor dispersão dos erros. Guerra *et al.* (2024) reportaram que um espectrômetro SW-NIR pocket-sized previu teor de gordura com elevada capacidade preditiva ($R^2 = 0,93$; RMSEP* = 0,40), mas reconheceram limitações na predição de outros traços (proteína, lactose, ureia) na mesma faixa espectral, corroborando a heterogeneidade entre os sensores em nosso estudo. Além

disso, abordagens em linha combinadas com *machine learning* mostraram que redes neurais podem melhorar predições de indicadores metabólicos extraídos do leite quando comparadas a PLS tradicionais, ressaltando que o desempenho é fortemente dependente do equipamento, do pré-processamento espectral e da representatividade amostral (Giannuzzi *et al.*, 2022).

A determinação dos teores de proteína (Tabela 2) foi inferior ao observado para gordura, com desempenho moderado e $R^2 = 0,36$ (A32R024), $R^2 = 0,26$ (A32R019) e $R^2 = 0,38$ (A32R026), refletindo uma menor robustez preditiva para esse conjunto de amostras. Os RMSEP* variaram entre 0,34, 0,29 e 0,33, enquanto o MAE oscilou entre 0,21 e 0,27, indicando que, apesar da correlação limitada, os erros absolutos mantiveram-se relativamente baixos. Quanto aos erros extremos, o erro máximo variou de 0,35 a 0,71, e o erro mínimo de -0,91 a -0,70.

Tabela 2. Resultados da predição de proteína no leite por espectroscopia NIR portátil

Equipamentos					
A32R024		A32R019		A32R026	
R ²	0,36	R ²	0,26	R ²	0,38
RMSEP*	0,34	RMSEP*	0,29	RMSEP*	0,33
MAE	0,27	MAE	0,21	MAE	0,27
Assertividade*	92,25	Assertividade*	93,82	Assertividade*	92,30
Erro Máximo	0,51	Erro Máximo	0,35	Erro Máximo	0,71
Erro Mínimo	-0,87	Erro Mínimo	-0,91	Erro Mínimo	-0,70

Legenda: R² – Coeficiente de determinação; RMSEP* – Raiz do erro quadrático médio de predição; Média erro absoluto (MAE); Assertividade* – Percentual de acertos dentro do intervalo de confiança definido; Erro Máximo – Maior valor de erro observado; Erro Mínimo – Menor valor de erro observado; Erro Absoluto – Diferença absoluta entre o valor observado e o predito.

Hussain *et al.* (2024) investigaram o potencial de sensores micro NIR baseados em interferômetro Fabry-Pérot (FPI) para quantificar componentes macroscópicos no leite cru, como gordura, proteína, lactose e sólidos totais. Utilizando dois sensores (S-2.0 e S-2.5), os resultados mostraram que o sensor S-2.0 apresentou RMSEP de 0,15% (gordura), 0,15% (proteína) e 0,30% (sólidos totais). Por outro lado, o sensor S-2.5 apresentou RMSEP de 0,35%

(gordura) e 0,33% (proteína), possivelmente devido à menor penetração da região NIR detectada por esse sensor, resultados semelhantes aos observados em nosso estudo.

Para os teores de lactose (Tabela 3), os modelos apresentaram uma predição limitada em relação à gordura e a proteína, com $R^2 = 0,04$ (A32R024), $R^2 = 0,04$ (A32R019), e $R^2 = 0,17$ (A32R026). O RMSEP* foi de 0,19, 0,20 e 0,21 respectivamente, enquanto o MAE variou entre 0,14 e 0,18, demonstrando desempenho consistente e boa precisão para essa variável. Os erros máximos variaram entre 0,35 e 0,62, e os erros mínimos entre -0,40 e -0,35. Segundo Shicheng *et al.* (2021), que avaliou a precisão de espectrômetros NIR MEMS portáteis para análise de componentes do leite cru, os R^2 para lactose foram relativamente baixos, variando de 0,16 a 0,20 e RMSEP próximos de 0,10 a 0,15%. Essa baixa correlação pode ser atribuída à reduzida variação natural de lactose nas amostras, interferências de outros componentes do leite e a limitações espectrais dos dispositivos portáteis.

Tabela 3. Resultados da predição de lactose no leite por espectroscopia NIR portátil

Equipamentos					
A32R024		A32R019		A32R026	
R ²	0,04	R ²	0,04	R ²	0,17
RMSEP*	0,19	RMSEP*	0,20	RMSEP*	0,21
MAE	0,14	MAE	0,15	MAE	0,18
Assertividade*	96,88	Assertividade*	96,69	Assertividade*	96,14
Erro Máximo	0,40	Erro Máximo	0,62	Erro Máximo	0,35
Erro Mínimo	-0,40	Erro Mínimo	-0,36	Erro Mínimo	-0,35

Legenda: R² – Coeficiente de determinação; RMSEP* – Raiz do erro quadrático médio de predição; Média erro absoluto (MAE); Assertividade* – Percentual de acertos dentro do intervalo de confiança definido; Erro Máximo – Maior valor de erro observado; Erro Mínimo – Menor valor de erro observado; Erro Absoluto – Diferença absoluta entre o valor observado e o predito.

Os resultados para sólidos totais (Tabela 4) apresentaram um bom desempenho, com $R^2 = 0,76$ (A32R024), $R^2 = 0,87$ (A32R019) e $R^2 = 0,74$ (A32R026), com RMSEP* de 0,62, 0,52 e 0,67, respectivamente. O MAE oscilou entre 0,40 e 0,53, indicando um bom desempenho, mas com capacidade limitada para capturar variações mais amplas da composição. Quanto aos erros

extremos, os erros máximos variaram de 1,32 a 1,70 e os erros mínimos de -1,11 a -0,86. Khan *et al.* (2024) também avaliaram sensores NIR para quantificar gordura, proteína e sólidos totais em leite cru, observando RMSEP de 0,30% para os sólidos não gordurosos (SNG), indicando desempenho moderado na predição dessa variável.

Tabela 4. Resultados da predição de sólidos totais no leite por espectroscopia NIR portátil

Equipamentos					
A32R024		A32R019		A32R026	
R ²	0,76	R ²	0,87	R ²	0,74
RMSEP*	0,62	RMSEP*	0,52	RMSEP*	0,67
MAE	0,50	MAE	0,40	MAE	0,53
Assertividade*	95,84	Assertividade*	96,52	Assertividade*	95,45
Erro Máximo	1,53	Erro Máximo	1,32	Erro Máximo	1,70
Erro Mínimo	-0,86	Erro Mínimo	-1,11	Erro Mínimo	-0,91

Legenda: R² – Coeficiente de determinação; RMSEP* – Raiz do erro quadrático médio de predição; Média erro absoluto (MAE); Assertividade* – Percentual de acertos dentro do intervalo de confiança definido; Erro Máximo – Maior valor de erro observado; Erro Mínimo – Menor valor de erro observado; Erro Absoluto – Diferença absoluta entre o valor observado e o predito.

A capacidade preditiva para N-ureico (Tabela 5) apresentou um desempenho moderado, com R²= 0,19 (A32R024), R²= 0,50 (A32R019) e R²= 0,60 (A32R026). O RMSEP* variou entre 4,33, 4,61 e 2,74, respectivamente, enquanto o MAE entre 2,22 e 3,37, refletindo elevada variabilidade e limitações na predição de N-ureico. Os erros máximos variaram de 4,15 e 12,16 e o erro mínimo entre -10,35 e -5,95. Um estudo de Purnomoadi *et al.* (1999) investigou o uso da espectroscopia NIR para medir componentes nitrogenados do leite, os resultados indicaram que a previsão do N-ureico apresentou um R²= 0,31, sugerindo uma precisão limitada na quantificação dessa variável. Corroborando com os resultados Guerra *et al.* (2023) que também utilizaram um espectrofotômetro NIR portátil de ondas curtas para prever o conteúdo de N-ureico encontraram um R²= 0,43. A baixa precisão pode ser atribuída à falta de bandas espectrais específicas para o N-ureico, interferências de outros componentes do leite e limitações dos dispositivos NIR portáteis.

Tabela 5. Resultados da predição de N-ureico no leite por espectroscopia NIR portátil

Equipamentos					
A32R024		A32R019		A32R026	
R ²	0,19	R ²	0,50	R ²	0,60
RMSEP*	4,33	RMSEP*	4,61	RMSEP*	2,74
MAE	3,37	MAE	3,23	MAE	2,22
Assertividade*	59,45	Assertividade*	52,32	Assertividade*	82,78
Erro Máximo	9,31	Erro Máximo	12,16	Erro Máximo	4,15
Erro Mínimo	-6,72	Erro Mínimo	-10,35	Erro Mínimo	-5,95

Legenda: R² – Coeficiente de determinação; RMSEP* – Raiz do erro quadrático médio de predição; Média erro absoluto (MAE); Assertividade* – Percentual de acertos dentro do intervalo de confiança definido; Erro Máximo – Maior valor de erro observado; Erro Mínimo – Menor valor de erro observado; Erro Absoluto – Diferença absoluta entre o valor observado e o predito.

Para a variável extrato seco desengordurado (ESD) (Tabela 6), o modelo obteve valores intermediários, com R²= 0,36 (A32E024), R²= 0,25 (A32R019) e R²= 0,42 (A32R026). O RMSEP* variou entre 0,34, 0,32 e 0,40, respectivamente e o MAE entre 0,26 e 0,30, indicando predição razoável, embora limitada em acurácia entre diferentes equipamentos. Quanto aos erros extremos, os erros máximos variaram entre 0,57 e 0,76, e os erros mínimos entre -0,91 e -0,85. PU *et al.* (2021) avaliaram o MicroPhazir™ aplicado a leite cru e relataram que os modelos de calibração para SNG (sólidos não gordurosos) obtiveram R²= 0,61 e RMSEP= 0,22%. Li *et al.* (2011) em um estudo com espectroscopia NIR de onda curta portátil para SNG observaram desempenho mais limitado, com RMSEP= 0,296, destacando as limitações da tecnologia portátil para estimativa do ESD.

Tabela 6. Resultados da predição de ESD no leite por espectroscopia NIR portátil

Equipamentos					
A32R024		A32R019		A32R026	
R ²	0,36	R ²	0,25	R ²	0,42
RMSEP*	0,34	RMSEP*	0,32	RMSEP*	0,40
MAE	0,26	MAE	0,26	MAE	0,30
Assertividade*	97,19	Assertividade*	97,15	Assertividade*	96,84
Erro Máximo	0,76	Erro Máximo	0,57	Erro Máximo	0,60
Erro Mínimo	-0,85	Erro Mínimo	-0,87	Erro Mínimo	-0,91

Legenda: R² – Coeficiente de determinação; RMSEP* – Raiz do erro quadrático médio de predição; Média erro absoluto (MAE); Assertividade* – Percentual de acertos dentro do intervalo de confiança definido; Erro Máximo – Maior valor de erro observado; Erro Mínimo – Menor valor de erro observado; Erro Absoluto – Diferença absoluta entre o valor observado e o predito.

5. Considerações finais

Apesar de o modelo apresentar limitações para algumas variáveis analisadas, evidenciando limitações da tecnologia portátil, especialmente devido à menor sensibilidade espectral e à variabilidade natural desses componentes, algumas estratégias podem contribuir para aprimorar seu desempenho. Entre elas, destacam-se: o aumento do número de amostras, a utilização de algoritmos de predição mais robustos e a avaliação de diferentes equipamentos NIRS portáteis que apresentem maior sensibilidade e capacidade discriminatória.

6. Referências bibliográficas

- BEĆ, Krzysztof B.; GRABSKA, Justyna; HUCK, Christian W. Miniaturized NIR spectroscopy in food analysis and quality control: Promises, challenges, and perspectives. **Foods**, v. 11, n. 10, p. 1465, 2022.
- BERZAGHI, Paolo; RIOVANTO, Roberto. Near infrared spectroscopy in animal science production: principles and applications. **Italian Journal of Animal Science**, v. 8, n. sup3, p. 39-62, 2009.
- CEN, Haiyan; HE, Yong. Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality. **Trends in Food Science & Technology**, v. 18, n. 2, p. 72-83, 2007.
- CIURCZAK, Emil W.; IGNE, Benoit. **Pharmaceutical and medical applications of near-infrared spectroscopy**. CRC Press, 2014.
- DE LA ROZA-DELGADO, Begoña *et al.* Matching portable NIRS instruments for in situ monitoring indicators of milk composition. **Food Control**, v. 76, p. 74-81, 2017.
- DIAZ-OLIVARES, Jose A. *et al.* Near-infrared spatially-resolved spectroscopy for milk quality analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 219, p. 108783, 2024.
- GUERRA, Alberto *et al.* Application of a short-wave pocket-sized near-infrared spectrophotometer to predict milk quality traits. **Journal of dairy science**, v. 107, n. 6, p. 3413-3419, 2024.
- GIANNUZZI, Diana *et al.* In-line near-infrared analysis of milk coupled with machine learning methods for the daily prediction of blood metabolic profile in dairy cattle. **Scientific reports**, v. 12, n. 1, p. 8058, 2022.
- GULLIFA, Giuseppina *et al.* Portable NIR spectroscopy: The route to green analytical chemistry. **Frontiers in Chemistry**, v. 11, p. 1214825, 2023.

- HANUŠ, O. *et al.* Effect of raw cow milk composition on its physicochemical characteristics. **Mljekarstvo**, v. 68, n. 3, p. 211–223, 2018. DOI: <https://doi.org/10.15567/mljekarstvo.2018.0302>.
- HARNLY, James M. *et al.* Characterization of near-infrared spectral variance in the authentication of skim and nonfat dry milk powder collection using ANOVA-PCA, pooled-ANOVA, and partial least-squares regression. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 62, n. 32, p. 8060-8067, 2014.
- HAUGHEY, Simon A. *et al.* The use of handheld near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for the proximate analysis of poultry feed and to detect melamine adulteration of soya bean meal. **Analytical Methods**, v. 7, n. 1, p. 181-186, 2015.
- KHAN, HM Hussain *et al.* Quantification of macro-components in raw milk using micro NIR sensors. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 133, p. 106423, 2024.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Pesquisa Trimestral do Leite. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9209-pesquisa-trimestral-do-leite.html>.
- LI, Xiao-yun *et al.* Determination of fat, protein and DM in raw milk by portable short-wave near infrared spectrometer. **Spectroscopy and Spectral Analysis**, v. 31, n. 3, p. 665-668, 2011.
- LUIZ, Leandro da Conceicao *et al.* Detection of veterinary antimicrobial residues in milk through near-infrared absorption spectroscopy. **Journal of Spectroscopy**, v. 2018, n. 1, p. 5152832, 2018.
- MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. Mapa do Leite. Brasília: MAPA, 2023.
- MARCONDES, Marcos Inácio *et al.* Impact of farm size on milk quality in the Brazilian dairy industry according to the seasons of the year. **Ciência Rural**, v. 47, n. 11, p. e20161004, 2017.
- OSBORNE, Brian G.; FEARN, Thomas; HINDLE, Peter H. **Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis**. 1993.
- PU, Yuanyuan *et al.* Recent advances in portable and handheld NIR spectrometers and applications in milk, cheese and dairy powders. **Foods**, v. 10, n. 10, p. 2377, 2021.
- REGO, Guillermo *et al.* A portable IoT NIR spectroscopic system to analyze the quality of dairy farm forage. **Computers and electronics in agriculture**, v. 175, p. 105578, 2020.
- RETSCH, R. Sample Preparation for NIR Analysis. Spectroscopy Online, 1 set. 2011.

- RIU, Jordi *et al.* Rapid analysis of milk using low-cost pocket-size NIR spectrometers and multivariate analysis. **Foods**, v. 9, n. 8, p. 1090, 2020.
- SANTOS, M. V.; FONSECA, L. F. L. Qualidade do leite: interpretação de resultados laboratoriais. 3. ed. Pirassununga: Edição dos Autores, Embrapa, 2021.
- SHICHENG, Qiao *et al.* Nondestructive detection of decayed blueberry based on information fusion of hyperspectral imaging (HSI) and low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR). **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 184, p. 106100, 2021.
- SU, Wen-Hao; SUN, Da-Wen. Fourier transform infrared and Raman and hyperspectral imaging techniques for quality determinations of powdery foods: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 17, n. 1, p. 104-122, 2018.
- DOS SANTOS, Claudia A. Teixeira *et al.* A review on the applications of portable near-infrared spectrometers in the agro-food industry. **Applied spectroscopy**, v. 67, n. 11, p. 1215-1233, 2013.
- TSENKOVA, R. *et al.* Near-infrared spectroscopy for dairy management: measurement of unhomogenized milk composition. **Journal of dairy science**, v. 82, n. 11, p. 2344-2351, 1999.
- VINCENT, Baeten; DARDENNE, Pierre. Application of NIR in Agriculture. In: **Near-infrared spectroscopy: Theory, spectral analysis, instrumentation, and applications**. Singapore: Springer Singapore, 2020. p. 331-345.
- WALSTRA, P. *et al.* **Dairy Science and Technology**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- WANG, Yanyan *et al.* Portable protein and fat detector in milk based on multi-spectral sensor and machine learning. **Applied Sciences**, v. 13, n. 22, p. 12320, 2023.
- YAKUBU, Haruna Gado *et al.* The recent advances of near-infrared spectroscopy in dairy production—A review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 62, n. 3, p. 810-831, 2022.

Autores

Paola O. Selau¹, Francine B. Facco¹, Monique de L. Antunes¹, Nathália M. Veronezi¹, Andrieli Stefanello², Renan Cecchin², Pamela I. Otto¹, Julio Viégas¹

¹ Departamento de Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, ² Zeit Soluções em Inteligência Artificial Ltda – Santa Maria/RS.

CAPÍTULO 7

O papel ensilagem nas emissões de gases na pecuária: causas e potenciais estratégias de mitigação

Francine B. Facco, Duvan S. Bautista, Eduarda R. de Oliveira, Maria E. P. Hamerski, Paola O. Selau, Leticia M. Winck, Monique Évelyn L. Pacheco, Julio Viégas, Tiago A. Del Valle

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-39-8.c7>

Resumo

A pecuária é uma das principais fontes de gases de efeito estufa (GEE) no setor agropecuário global. O metano entérico e as emissões associadas à produção e conservação de forragens representam importantes desafios de mitigação. Este capítulo tem como objetivo quantificar as emissões de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) durante a ensilagem de planta inteira de milho e de grão de milho reidratado, avaliando o efeito do tamanho de partícula e da inoculação bacteriana na cinética de produção desses gases. Experimentos estão sendo conduzidos em silos laboratoriais, com partículas grandes ou pequenas e inoculantes microbianos de diferentes perfis (homofermentativo e heterofermentativo). A produção cumulativa de gases foi monitorada por 56 dias por meio do deslocamento de água, e as concentrações de CO₂, CH₄ e N₂O foram determinadas por cromatografia gasosa. Na silagem de planta inteira, a redução do tamanho de partícula acelerou as perdas fermentativas e a produção de gases nos dias iniciais, mas partículas maiores reduziram as emissões totais de CH₄ em 27,5%, de 29,1 para 21,1 mg CH₄ /ton. de MS. A inoculação homofermentativa não alterou as emissões. No grão reidratado, não houve efeito significativo do tamanho de partícula e da inoculação sobre as perdas. Assim, o aumento do tamanho de partículas promove fermentação mais estável e menor liberação de metano, sendo uma alternativa de mitigação de GEE na pecuária leiteira.

Palavras-chave: tamanho de partícula, metano entérico, gases de efeito estufa, fermentação láctica.

1. Introdução

A agropecuária desempenha papel essencial na produção de alimentos e na economia brasileira, mas também está entre os principais setores associados às emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente em um contexto de crescente preocupação global com as mudanças climáticas. A pecuária se destaca nesse cenário por responder pela maior parte das emissões do setor, em especial metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), gases com elevado potencial de aquecimento global.

De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2024), em 2023 o setor agropecuário brasileiro emitiu 631,1 Mt de CO_2 equivalente, sendo 80% provenientes da pecuária (503,5 Mt CO_2 equivalente) e 20% da agricultura (127,6 Mt CO_2 equivalente). A fermentação entérica representou a principal fonte de emissão, responsável por 64,2% do total do setor (405,1 Mt CO_2 equivalente), o que corresponde a um aumento de 1,5% em relação a 2022. Esses números reforçam a relevância da pecuária tanto na economia quanto nos desafios ambientais associados ao aquecimento global.

A produção animal, em especial a bovinocultura de leite, está entre as principais atividades agropecuárias associadas à emissão de GEE. Segundo o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2019), os fatores de emissão nesta cadeia estão distribuídos entre diversas etapas do sistema produtivo. O metano entérico, resultante da fermentação microbiana no rúmen, constitui a principal fonte de emissões diretas em bovinos leiteiros, devido ao elevado consumo de matéria seca e à natureza fibrosa das dietas. Em vacas de alta produtividade, os fatores de emissão podem alcançar em média 138 kg CH_4 animal/ano, enquanto em sistemas de menor produtividade as emissões absolutas são menores, mas a intensidade por litro de leite tende a ser mais elevada (IPCC, 2019).

Além disso, o manejo de dejetos é uma importante fonte secundária de CH_4 e N_2O . Em sistemas anaeróbios, como lagoas de armazenamento, o fator de conversão de CH_4 pode atingir 80-90% em climas quentes, enquanto em sistemas secos os valores ficam próximos de 1–5 g CH_4 /kg de sólidos voláteis

excretados (IPCC, 2019). Para o N_2O , os fatores médios de emissão situam-se em torno de 0,01 kg N_2O por kg de N excretado, dependendo do tipo de sistema adotado.

As emissões de GEE na pecuária não se limitam aos animais e dejetos. A produção de alimentos para o rebanho, especialmente grãos e forragens, representa outra fonte significativa, associada ao uso de fertilizantes, preparo do solo, mecanização e transporte. Embora o IPCC (2019) não apresente um fator único de emissão para essa etapa, reconhece que a intensidade de CO_2 e N_2O depende fortemente do tipo de cultivo e das práticas agrícolas adotadas.

2. Emissões de gases de efeito estufa na ensilagem

A conservação de forragens por meio da ensilagem é prática essencial para garantir o fornecimento contínuo de volumoso e manter a estabilidade produtiva dos sistemas pecuários. Contudo, o processo de fermentação anaeróbia responsável por essa conservação também pode ser uma fonte significativa de GEE. Dessa forma, as silagens passam a integrar o balanço total de emissões na pecuária, tanto por seus efeitos diretos, provenientes do processo fermentativo e da abertura dos silos, quanto por seus efeitos indiretos, relacionados à digestibilidade e às emissões entéricas dos animais que as consomem.

Durante a fermentação, a degradação de açúcares e compostos nitrogenados pode gerar emissões gasosas que representam perdas de energia e matéria seca, reduzindo a eficiência da conservação e o valor nutritivo da silagem. Além disso, esses gases possuem alto potencial de aquecimento global: o CH_4 é cerca de 28 vezes mais potente que o CO_2 , enquanto o N_2O apresenta potencial 265 vezes superior (IPCC, 2021). Assim, mesmo pequenas emissões durante a ensilagem podem gerar impactos climáticos relevantes e comprometer a sustentabilidade ambiental da produção pecuária.

A importância da silagem para o balanço de emissões não se limita ao processo de fermentação. O consumo de silagem de melhor qualidade pode contribuir indiretamente para a mitigação das emissões entéricas, uma vez que forragens mais digestíveis favorecem o aproveitamento energético e reduzem a

produção de CH₄ no rúmen (Jung *et al.*, 2024). Portanto, a qualidade fermentativa da silagem influencia tanto a eficiência alimentar dos ruminantes quanto o perfil de emissão de gases ao longo de toda a cadeia produtiva.

Apesar de sua relevância, a dinâmica de emissão de GEE durante a ensilagem ainda é pouco conhecida. Estudos indicam que os fluxos de gases tendem a ser mais intensos nos primeiros dias de fermentação, reduzindo-se gradualmente à medida que o ambiente se estabiliza. Estratégias como o uso de aditivos microbianos e fontes de carboidratos rapidamente fermentescíveis, a exemplo de *Lactilactobacillus plantarum* e o uso de adsorventes de umidade como o milho, têm demonstrado potencial para otimizar a fermentação e atenuar a produção de gases, reduzindo perdas e emissões simultaneamente (Tian *et al.*, 2025).

Diante desse cenário, a silagem assume papel estratégico na mitigação de GEE. Quando adequadamente produzida e conservada, fornece um volumoso de alta qualidade que contribui para menores emissões durante o armazenamento e também para redução das emissões entéricas. Assim, o manejo eficiente da ensilagem deve ser compreendido não apenas como prática de conservação de forragens, mas como uma ferramenta efetiva de sustentabilidade ambiental na pecuária. De forma integrada, compreender e mitigar as emissões de GEE em todas as etapas da cadeia produtiva (da produção e conservação das forragens ao manejo de dejetos) é fundamental para atender às metas globais de neutralidade de carbono e garantir a sustentabilidade dos sistemas de produção animal (Gerber *et al.*, 2013; IPCC, 2019; SEEG, 2024).

3. Atividades desenvolvidas no LABLEITE-UFSM

O Laboratório de Bovinocultura de Leite (LABLEITE), vinculado ao Departamento de Zootecnia da UFSM, desenvolve pesquisas voltadas à avaliação e mitigação das emissões de GEE em sistemas de produção animal, com foco em estratégias que aliem eficiência fermentativa, conservação de forragens e sustentabilidade ambiental. Entre as iniciativas em andamento, destacam-se os projetos apoiados pela Fundação de Amparo à Pesquisa do

Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), por meio do EDITAL FAPERGS 06/2024 – Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Voltado a Desastres Climáticos, sob coordenação dos professores Tiago Antonio Del Valle e Julio Viégas.

O projeto “Emissões de gases de efeito estufa durante a ensilagem de grão reidratado e planta inteira de milho” tem como objetivo avaliar a liberação de CO_2 , CH_4 e N_2O durante o processo de ensilagem e a fase de estabilidade aeróbia, buscando identificar fatores que influenciam a fermentação e as perdas nutricionais. As atividades envolvem a participação dos pós-graduandos Francine Basso Facco, responsável pelos estudos com silagem de grão reidratado, e Duvan Sanabria Bautista, que conduz experimentos com planta inteira de milho.

3.1. Material e métodos

A cinética de produção de gases de efeito estufa (GEE) foi avaliada durante o processo de ensilagem em dois experimentos independentes, utilizando silos experimentais confeccionados com garrafas âmbar de 2 L, com tampas adaptadas com rolhas de borracha para a amostragem dos gases produzidos (Figura 1).



Figura 1. Tampa plástica contendo disco de borracha butílica

Os experimentos foram conduzidos de forma independente, com o objetivo comum de avaliar o efeito do tamanho de partícula e da adição de inoculantes microbianos sobre as emissões de gases durante a ensilagem de

planta inteira de milho (Experimento I) e de grão de milho reidratado (Experimento II). A fase experimental do experimento I foi realizada entre 17 de abril e 26 de junho de 2025, enquanto que o experimento II foi conduzido entre 15 de julho e 22 de setembro de 2025.

No ensilado de planta inteira de milho, foram utilizados 32 silos experimentais em delineamento em blocos casualizados, avaliando-se quatro tratamentos, obtidos de um arranjo fatorial 2×2 pela combinação do efeito de: I) tamanho de partícula (TP): a) grande: $610 \pm 67,5$ g/kg (média±S) das partículas maiores que 8 mm; b) pequena: $414 \pm 65,8$ g/kg de partículas maiores que 8 mm. II) inoculação: inoculante microbiano homofermentativo (320.000 unidades formadoras de colônia - UFC de *Lactobacillus plantarum* [ATCC 5870] e 320.000 UFC de *Pediococcus acidilactici* [ATCC 5866]) por grama de material ensilado. O material vegetal foi colhido com um teor de matéria seca (MS) de $247 \pm 21,5$ g/kg de matéria natural (MN), e os silos foram compactados a uma densidade de 750 kg/m³.

No ensaio com silagem de grão de milho reidratado (GMR), avaliaram-se dois tamanhos de partícula (grandes, com 1850 µm de diâmetro médio, e pequenas, com 970 µm de diâmetro médio) e dois níveis de inoculante microbiano (0 e 200.000 UFC/g de *Lentilactobacillus buchneri*). Os cinco níveis de matéria seca (600, 630, 650, 670 e 700 g/kg), foram considerados blocos no delineamento, a fim de controlar a variação relacionada ao teor de umidade. Cada silo de GMR continha cerca de 1,9 kg de material compactado a uma densidade de 950 kg/m³.

Os silos foram vedados e armazenados durante 56 dias. A produção cumulativa de gases (mL/Kg de MN) foi medida nos dias 1, 2, 4, 7, 14, 28, 42 e 56 após a ensilagem, utilizando um sistema de bureta calibrada baseado no método de deslocamento de água conforme descrito por Weinberg (2018). Em cada intervalo de medição, realizaram-se pesagens pré e pós-coleta em balança semi-analítica (precisão de 0,01 g) para mensuração das perdas por gases. Simultaneamente, as amostras gasosas foram coletadas com seringas herméticas após homogeneização do *headspace*. Estas amostras foram analisadas para metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e óxido nitroso (N₂O),

quantificados por cromatografia gasosa em um cromatógrafo (GC-2014, Shimadzu Brasil).

Os dados foram analisados utilizando o PROC MIXED (versão 9.4., SAS Inc., Cary, NC) e usando o modelo abaixo:

$$Y_{jkl} = \mu + TP_i + INO_j + TP \times INO_{ij} + b_k + \omega_{ijk} + T_l + \\ T \times TP_{ijk} + T \times INO_{ijk} + T \times TP \times INO_{ijk} + e_{ijkl}$$

em que: Y_{jkl} é o valor observado da variável dependente; μ é a média geral; TP_i é o efeito fixo do tamanho de partícula ($i = 1$ e 2); INO_j é o efeito fixo da inoculação ($j = 1$ e 2); b_k é o efeito aleatório da do bloco k (1 a 5), em que assume-se $\omega_{ijk} \sim N(0, \sigma_b^2)$; ω_{ijk} é o erro associado à parcela (silo), em que assume-se em que assume-se $T_l \sim N(0, \sigma_e^2)$; T_l é o efeito fixo do tempo de avaliação; $TP \times INO_{ij}$, $T \times TP_{ijk}$, $T \times INO_{ijk}$ e $T \times TP \times INO_{ijk}$ são efeitos de interação entre os efeitos previamente descritos; e_{ijkl} é o erro residual, em que assume-se $NRM(0, R)$; N indica distribuição normal ou gaussiana; σ_b^2 e σ_e^2 são as variâncias associadas ao efeito aleatório de bloco e parcela, respectivamente; NRM indica análise multivariada com distribuição aproximadamente normal; R é uma matriz de variância e covariância em função das medidas repetidas no tempo. As matrizes CS, CSH, AR, ARH, TOEP, TOEPH, UN, FA e ANTE foram avaliadas de acordo com o critério bayesiano. Para todas as análises foi considerado um nível de significância de 5%.

3.2. Resultados e discussões

3.2.1. Experimento I

Houve interação entre os efeitos de tempo e tamanho de partículas ($P = 0,002$) sobre as perdas fermentativas (Figura 2), pois as partículas pequenas aumentaram as perdas nas avaliações realizadas 1 e 2 dias após a ensilagem. Em contraste, a inoculação não influenciou nenhum efeito ($P \geq 0,676$) sobre as perdas e a produção cumulativa de gases (Figura 3), independentemente do tempo e do tamanho de partículas ($P \geq 0,273$).

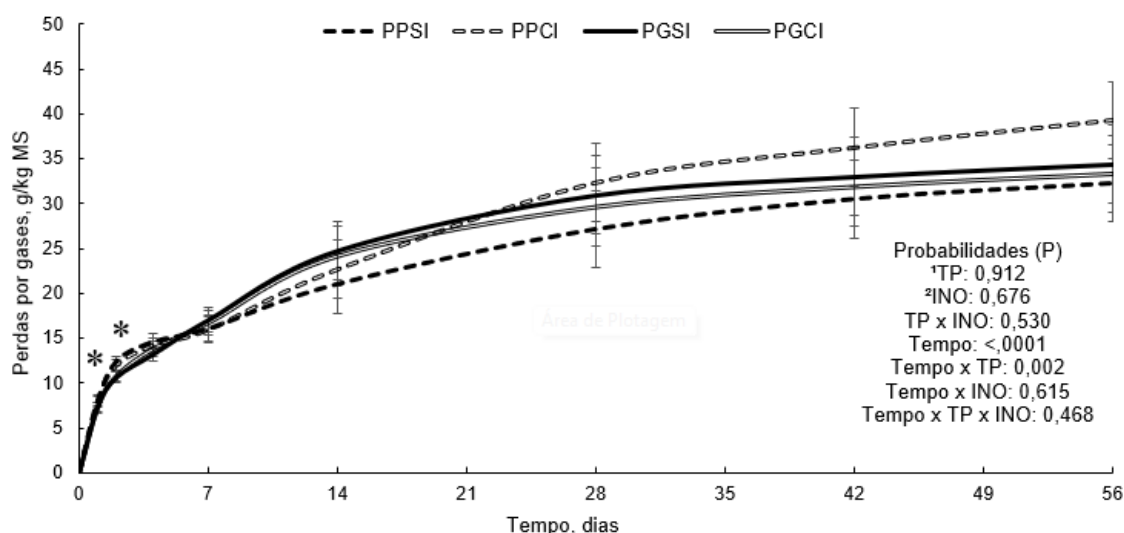


Figura 2. Perdas por gases (g/Kg MS), em silagem de planta inteira de milho durante o processo fermentativo

Tratamentos: PPSI: partícula pequena sem inoculante; PPCI: partícula pequena com inoculante; PGSI: partícula grande sem inoculante e PGCI: partícula grande com inoculante;

¹TP: tamanho de partícula;

²INO: inoculante;

**efeito tamanho de partícula x tempo

Durante o processo de moagem, as estruturas vegetais sofrem ruptura das paredes celulares, expondo uma maior quantidade de carboidratos solúveis armazenados no interior das células. Nesse sentido, partículas menores caracterizam-se por ter maior disponibilidade de carboidratos solúveis e maior relação superfície-volume em comparação com partículas de maior tamanho, o que facilita o acesso de microrganismos fermentadores (como bactérias lácticas) a esses substratos. Essa maior liberação de substratos fermentáveis promove uma fermentação mais rápida e eficiente, devido ao fornecimento de uma fonte imediata de energia para as bactérias lácticas, estimulando a rápida produção de ácidos orgânicos e gases (Neumann *et al.*, 2007).

Por outro lado, partículas maiores apresentam menor capacidade de compactação associada a uma maior porosidade, resultando em níveis mais elevados de oxigênio residual no início da fermentação. Além disso, a menor relação superfície-volume limita o acesso microbiano aos carboidratos solúveis, tornando o processo fermentativo mais lento na fase inicial. Como consequência,

a combinação desses fatores contribui para uma taxa de acidificação mais lenta, favorecendo a proliferação de microrganismos indesejáveis (e.g., leveduras), que podem gerar maiores quantidades de gases devido à ocorrência de fermentações secundárias, acarretando perdas adicionais de energia e nutrientes ao longo do tempo (Brünig *et al.*, 2018). Desta forma, as partículas grandes apresentaram menores perdas por gases e produção gasosa durante os dias iniciais (1-2), em relação às partículas pequenas.

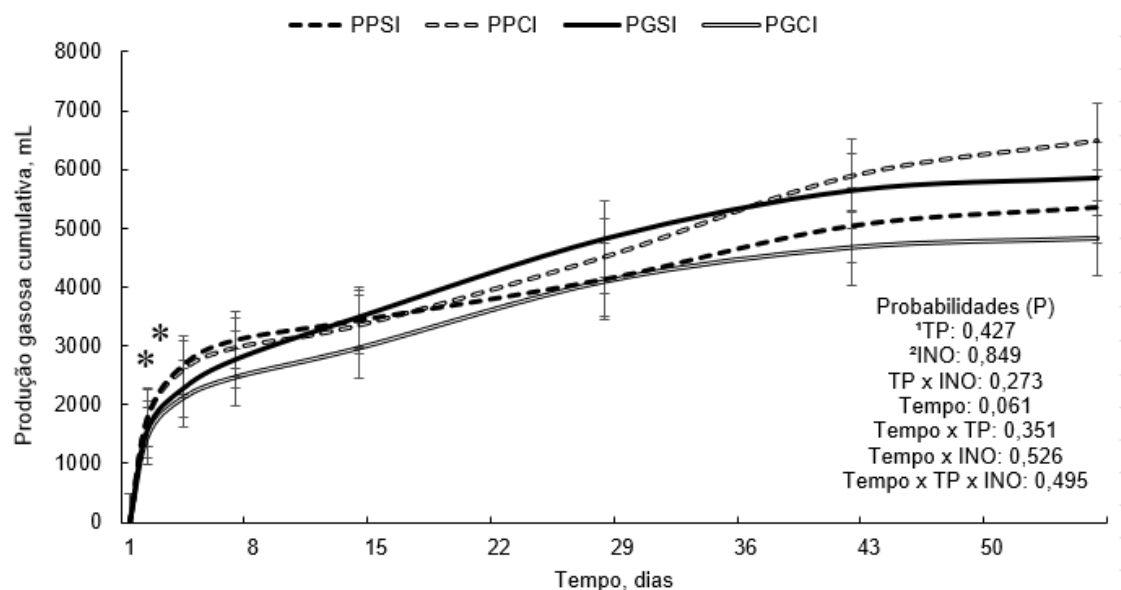


Figura 3. Produção cumulativa de gases (mL), em silagem de planta inteira de milho

Tratamentos: PPSI: partícula pequena sem inoculante; PPCI: partícula pequena com inoculante; PGSI: partícula grande sem inoculante e PGCI: partícula grande com inoculante;

¹TP: tamanho de partícula;

²INO: inoculante;

**efeito tamanho de partícula x tempo.

Reduzir as emissões de CH₄ e N₂O durante a ensilagem significa reter uma maior fração do carbono na forma de ácidos orgânicos estáveis e, conseqüentemente, conservar mais energia metabolizável no material ensilado (Guo *et al.*, 2021). As silagens produzidas com partículas maiores reduziram ($P < 0,001$) as emissões de CH₄, de 29,1 para 21,1 mg/ton. de MS, durante os 56 dias de armazenagem (Tabela 1).

De maneira geral, a produção de gases deste estudo foi de $555 \pm 71,02$ mL/g de MN perdida. Estudos prévios como os de Bueno *et al.* (2020), indicam que silagens bem conservadas, produzidas com boas práticas de manejo, apresentam perdas médias de 25,7 g/kg de MS. Em contraste, silagens mal preservadas podem atingir perdas médias de até 117 g/kg de MS. Nesse sentido, um bom manejo durante o processo de conservação pode reduzir essas perdas em 91,3 g/kg de MS. Considerando a produção total de gases observada neste estudo, obtivemos uma diminuição equivalente a 50,67 L de gases por kg de MS ensilada.

A produção de CH_4 durante a ensilagem está associada à atividade de microrganismos do gênero *Clostridium*, que degradam ácido láctico em ácido butírico e acético, liberando hidrogênio (H_2) como subproduto. Esse H_2 pode ser posteriormente utilizado por arqueias metanogênicas para a formação de CH_4 , por meio das reações de metanogênese a partir de H_2 e CO_2 , ou de acetato (McDonald *et al.*, 1991; Thauer *et al.*, 2008; Guo *et al.*, 2021). Tais microrganismos tendem a se desenvolver sob condições de pH elevado ($>5,0$) e alta umidade, típicas de fermentações indesejáveis (Ranjit e Kung, 2000; Ni *et al.*, 2017).

O comportamento decrescente nas concentrações de CH_4 ao longo do armazenamento pode ser atribuído à acidificação do meio ($\text{pH} < 4,5$), resultante da atividade das bactérias ácido-láticas, que convertem carboidratos solúveis em ácido láctico. Esse processo cria um ambiente mais estável e fortemente anaeróbio, inibindo o crescimento tanto de *Clostridium* quanto de arqueias metanogênicas (Schmithhausen *et al.*, 2022).

3.2.2. Experimento II

Para a silagem de grão de milho reidratado (GMR), nem o tamanho de partícula nem o uso de inoculante influenciaram ($P \geq 0,185$) a produção de gases durante a ensilagem, independente do tempo de avaliação (Figura 4).

Item	PP ¹		PG ²		SEM	Probabilidades						
	-INO ³	+INO ⁴	-INO	+INO		TP5	INO	TP×INO	Tempo	Tempo ×TP	Tempo ×INO	Tempo× TP×INO
Metano, mg/ton MS	23,52	24,74	18,29	15,79	1,26	0,007	0,785	0,439	< 0,001	0,009	0,434	0,217
N ₂ O, mg/ton MS	15451	18687	15805	15392	2629	0,582	0,597	0,496	< 0,001	0,272	0,904	0,988
CO ₂ , g/ton MS	26306	31911	28188	23290	1914	0,239	0,900	0,078	< 0,001	0,005	0,978	0,442
Eq. CO ₂ , g/ton MS	30401	36864	32377	27369	2452	0,239	0,808	0,064	< 0,001	0,005	0,973	0,535

¹PP: partícula pequena; ²PG: partícula grande; ³-INO: sem inoculação bacteriana; ⁴+INO: com inoculação bacteriana; ⁵TP: tamanho de partícula

No entanto, houve efeito do tempo ($P < 0,001$) sobre a produção acumulada de gases na ensilagem de GMR. As perdas por gases apresentaram rápido aumento nos primeiros dias de ensilagem, seguido de estabilização ao longo do período de avaliação. Esse padrão está relacionado à intensa atividade microbiana inicial, à presença de oxigênio residual e à fermentação de carboidratos solúveis, bem como à respiração vegetal, resultando em rápida liberação de CO₂ e outros gases antes do completo estabelecimento das condições anaeróbicas (McDonald *et al.*, 1991; Kung *et al.*, 2018; Xue *et al.*, 2025).

Nos primeiros dias após ensilagem, houve maior produção acumulada de gases na silagem de partículas pequenas em comparação às partículas grandes. A partir do 2º dia, observou-se uma fermentação mais intensa das partículas pequenas, diferença que se manteve até o dia 14, com produção acumulada de 1075 mL/kg MIN para partículas pequenas e 951 mL/kg MIN para partículas grandes. A partir do dia 28, ambas as curvas mostraram tendência de estabilização, chegando ao final do período (56 dias), com volumes semelhantes, médias de 1461 mL/kg MN para partículas grandes e 1485 mL/kg MIN para partículas pequenas. Esse comportamento indica que a redução do tamanho da partícula acelerou a fermentação nos estágios iniciais,

provavelmente devido à maior área de superfícies e favoreceram a atividade microbiana e a degradação dos substratos solúveis. Com o avanço da fermentação, entretanto, a disponibilidade de substratos facilmente degradáveis reduziu, o ambiente se tornou mais ácido e atividade microbiana diminuiu, resultando em volumes acumulados de gases finais semelhantes entre os tratamentos (Deeken *et al.*, 2024).

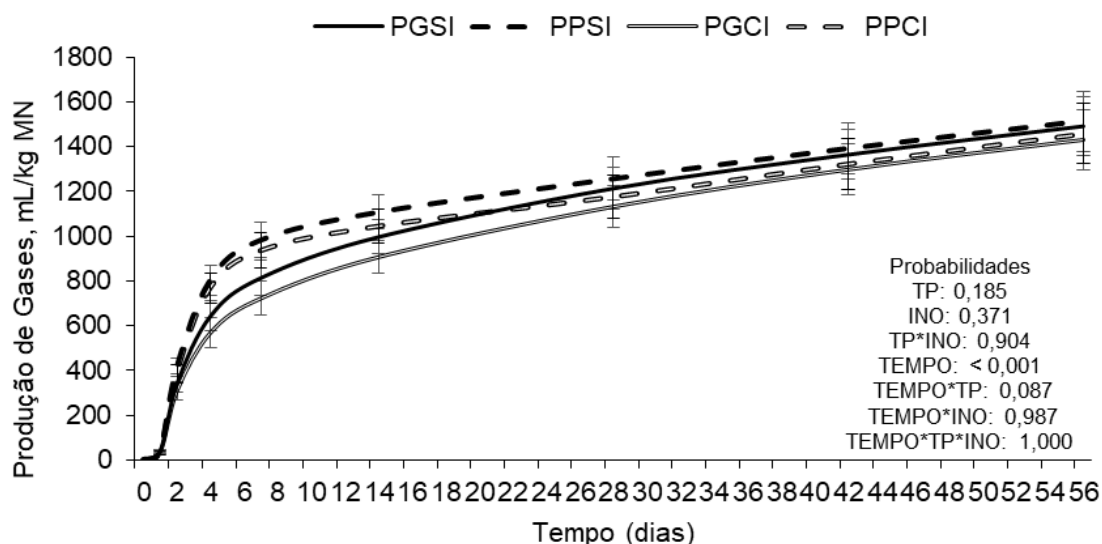


Figura 4. Produção de gases na ensilagem de grão de milho reidratado

Tratamentos: PPSI: partícula pequena sem inoculante; PPCI: partícula pequena com inoculante; PGSI: partícula grande sem inoculante e PGCI: partícula grande com inoculante;

TP: tamanho de partícula;

INO: inoculante.

Em contrapartida, Gervásio *et al.* (2023) observaram que, em silagens de grãos de milho reidratados, maiores perdas de matéria seca ocorreram em partículas maiores (1,69 e 1,75 mm) nos dias 15, 30 e 240, enquanto partículas menores apresentaram menores perdas. O efeito do tamanho de partícula apresentou comportamento quadrático nos dias 15 e 60, indicando que o impacto sobre as perdas varia ao longo do tempo de armazenamento. No presente estudo, com 56 dias de ensilagem, não foram observadas diferenças na produção total de gases entre os diferentes tamanhos de partículas, sugerindo que, à medida que a fermentação avança e os substratos facilmente

fermentáveis se esgotam, os efeitos iniciais do tamanho de partícula tornam-se menos evidentes, corroborando que seu impacto depende do estágio de armazenamento (Gervásio *et al.*, 2023).

As perdas por gases na ensilagem de GMR não foram influenciadas ($P \geq 0,794$) pelo tamanho de partícula ou uso de inoculante (Figura 5). No entanto, houve efeito do tempo ($P < 0,001$) sobre as perdas por gases na ensilagem de GMR. Embora a produção total de gases tenha sido menor, a silagem registrou maiores perdas em relação à matéria natural. Isso ocorre porque a fermentação heterofermentativa promovida por *Lactobacillus buchneri* resulta em maior degradação da matéria seca, devido à conversão de carboidratos solúveis em ácido lático, ácido acético, etanol e CO₂ (McDonald *et al.*, 1991; Rooke e Hatfield, 2003).

Além disso, o menor grau de compactação das partículas grandes favorece maior porosidade na silagem, permitindo maior circulação de ar e influenciando a forma como os gases se acumulam e são liberados. Dessa forma, a estrutura física das partículas interage com a atividade microbiana específica, afetando não apenas a taxa de fermentação, mas também a densidade, a composição e a dinâmica de produção de gases ao longo do tempo. O menor volume acumulado de gases indica que a produção foi mais lenta ou menos volumosa, possivelmente em função da compactação menos eficiente e da menor taxa de fermentação láctica, evidenciando que fatores físicos e microbiológicos distintos influenciam simultaneamente a quantidade efetiva de matéria degradada e o comportamento dos gases. Assim, esse processo não necessariamente produz grandes volumes de gás, mas implica em maior perda de matéria seca, refletida no aumento das perdas em g/kg de matéria natural (Kung *et al.*, 2007).

De modo geral as emissões na ensilagem de GMR foram de $447,81 \pm 85,69$ mL de gases por grama de matéria natural perdida, sendo influenciadas pelo tempo de armazenamento. Esse resultado indica que, à medida que a fermentação avança, ocorre maior degradação da matéria orgânica e liberação de CO₂, principalmente nas fases iniciais, quando a atividade microbiana é mais intensa e o processo ainda não está completamente estabilizado.

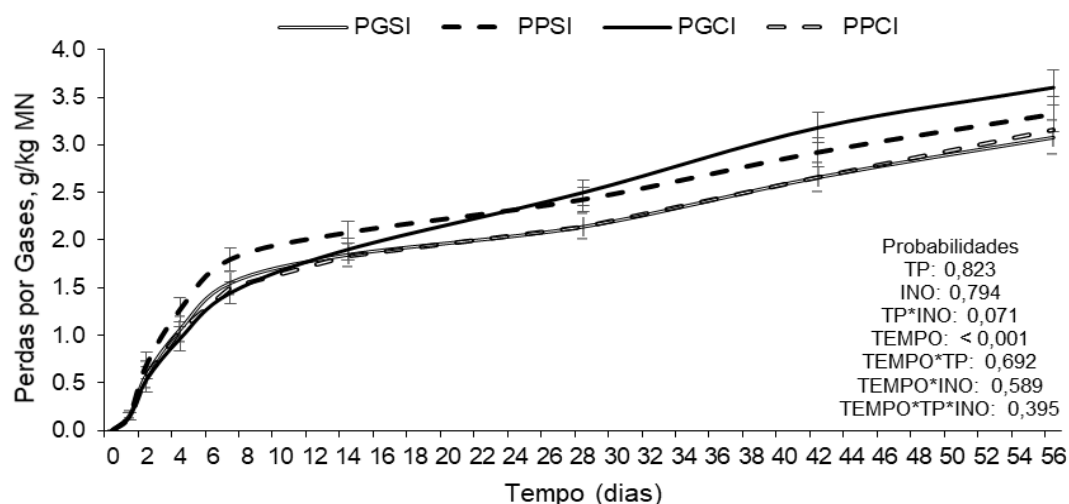


Figura 5. Perdas por gases (g/kg MN) na ensilagem de grão de milho reidratado

Tratamentos: PPSI: partícula pequena sem inoculante; PPCI: partícula pequena com inoculante; PGSI: partícula grande sem inoculante e PGCI: partícula grande com inoculante;

TP: tamanho de partícula;

INO: inoculante;

3.3. Considerações finais e perspectivas

Os resultados deste estudo evidenciam que a ensilagem, embora essencial para a sustentabilidade dos sistemas pecuários, contribui para as emissões de GEE, especialmente nas fases iniciais de fermentação. O aumento do tamanho de partícula reduz as emissões totais de GEE, configurando uma estratégia prática e de baixo custo para mitigação. A inoculação bacteriana, por sua vez, não apresenta efeito significativo sobre as emissões. Assim, ajustes simples no manejo físico e fermentativo da silagem podem contribuir para reter mais energia na forma de ácidos orgânicos, melhorar a qualidade do volumoso e reduzir o impacto climático da pecuária, fortalecendo o papel da ensilagem como ferramenta integrada em sistemas de produção de baixo carbono.

4. Referências bibliográficas

BRÜNING, D. *et al.* Effect of compaction, delayed sealing and aerobic exposure on maize silage quality and on formation of volatile organic compounds. **Grass Forage Sci.** 73:53–66, 2018. <https://doi.org/10.1111/gfs.12288>.

- BUENO, Antonio *et al.* Natamycin as a potential silage additive: A lab trial using sugarcane to assess greenhouse gas emissions. **Rev. Bras. Zootec.** 49:e20200017, 2020. <https://doi.org/10.37496/rbz4920200017>.
- DEEKEN, Hauke *et al.* Greenhouse gas and volatile organic compound emissions of additive-treated whole-plant maize silage: Part A-anaerobic fermentation period. **Chem. Biol. Technol. Agric.** 11:134, 2024. <https://doi.org/10.1186/s40538-024-00655-0>.
- GERBER, P. J. *et al.* **Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities.** Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, 2013.
- GERVÁSIO, Jessica *et al.* Effects of particle size and storage length on the fermentation pattern and ruminal disappearance of rehydrated corn grain silage hammer mill processed. **Anim. Feed Sci. Technol.** 306:115810, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115810>.
- GUO, Bing *et al.* Enhanced methane production from waste activated sludge by potassium ferrate combined with ultrasound pretreatment. **Bioresour. Technol.** 341:125841, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125841>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2019.** Acessado: 23 de setembro de 2025. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
- JUNG, Jeong *et al.* Changes in microbial dynamics and fermentation characteristics of alfalfa silage: A potent approach to mitigate greenhouse gas emission through high-quality forage silage. **Chemosphere** 362:142920, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142920>.
- KUNG, Limin *et al.* Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages. **J. Dairy Sci.** 101:4020–4033, 2018. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13909>.
- KUNG, Limin *et al.* The effect of *Lactobacillus buchneri* 40788 on the fermentation and aerobic stability of high-moisture corn. **J. Dairy Sci.** 90:2309–2314, 2007. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-602>.
- MCDONALD, Peter. Henderson, and S. J. E. Heron. 1991. **The Biochemistry of Silage.** 2nd ed. Chalcombe Publications, Marlow, UK.
- NEUMANN, Mikael *et al.* Características da fermentação da silagem obtida em diferentes tipos de silos sob efeito do tamanho de partícula e da altura de colheita das plantas de milho. **Ciência Rural** 37:847–854, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782007000300038>.
- NI, Kuikui *et al.* Comparative microbiota assessment of wilted Italian ryegrass, whole crop corn, and wilted alfalfa silage using denaturing gradient gel electrophoresis and next-generation sequencing. **Appl. Microbiol.**

- Biotechnol.** 101:1385–1394, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7900-2>.
- RANJIT, N.K; KUNG, Limin. The Effect of *Lactobacillus buchneri*, *Lactobacillus plantarum*, or a Chemical Preservative on the Fermentation and Aerobic Stability of Corn Silage. **J. Dairy Sci.** 83: 526-35, 2000. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74912-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74912-5).
- ROOKE, Jonh. Hatfield. Biochemistry of ensiling. Pages 95–139 in **Silage Science and Technology**. D. R. Buxton, R. E. Muck, and H. J. Holmes, ed. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, 2003.
- SCHMITHAUSEN, Alexander *et al.* Greenhouse gas formation during the ensiling process of grass and lucerne silage. **J. Environ. Manage.** 304:114142, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114142>.
- SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa). **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil, 2024**. Acessado: 23 de setembro de 2025. <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>.
- Thauer, Rudolf *et al.* Methanogenic archaea: Ecologically relevant differences in energy conservation. **Nat. Rev. Microbiol.** 6:579–591, 2008. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1931>.
- TIAN, Jing *et al.* Gas production characteristics of oats and triticale silages and techniques for reducing gas emissions. **J. Integr. Agric.** 24:1246–1258, 2025. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(24\)61127-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(24)61127-4).
- WEINBERG, Richard. Measuring yeast fermentation kinetics with a homemade water displacement volumetric gasometer. **J. Chem. Educ.** 95:828–832, 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00975>.
- XUE, Yanlin *et al.* Dynamics of gas and greenhouse gases production during fermentation of barley silage with lactic acid bacteria. **Chem. Biol. Technol. Agric.** 11:82, 2024. <https://doi.org/10.1186/s40538-024-00582-8>.

Autores

Francine B. Facco, Duvan S. Bautista, Eduarda R. de Oliveira, Maria E. P. Hamerski, Paola O. Selau, Leticia M. Winck, Monique Évelyn L. Pacheco, Julio Viégas, Tiago A. Del Valle

Departamento de Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

CAPÍTULO 8

Manejo de pastagens naturais do Bioma Pampa: impactos na produtividade forrageira e animal

Juliana Medianeira Machado, Camila Soares Martins, Dinah Pereira Abbott Rodrigues, Fernando Forster Furquim, Arthur Fernandes Bettencourt, Eduarda Gabriely de Souza, Fábio Pedrazzi de Vargas, Gabriele Da Roza dos Santos, Gustavo Pires Luft, João Vitor de Campos Aguiar, Maiani Vieira Domingues, Anna Vargas Magalhães, Maria Eduarda Cassol Vincensi, Daniel Pivotto Cerezer, Paula Montagner

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-39-8.c8>

Resumo

Este capítulo sintetiza evidências sobre como o manejo de pastagens naturais do bioma Pampa impacta a produtividade forrageira e animal, conciliando conservação e desempenho. O Pampa, mosaico campestre com biodiversidade, sustenta a pecuária gaúcha, mas sofre com conversões e uso inadequado, refletidos em produtividades médias de 60–70 kg de peso corporal (PC)/ha/ano. A estrutura do dossel é determinada pela proporção de estratos prostrado (captura de recursos, maior valor nutritivo) e cespitoso (conservação, maior material morto), modulada pela sazonalidade (C4>C3) e por decisões de manejo. Quatro tecnologias de processos são centrais: (i) tipologia funcional (A–D) para interpretar funções ecológicas do dossel e orientar metas de altura/desfolha; (ii) diferimento, que acumula forragem, restaura áreas superpastejadas e eleva biomassa radicular (>35%), favorecendo bancos de sementes; (iii) ajuste dinâmico da taxa de lotação, evitando lotações fixas e sincronizando oferta de recursos/demanda animal; e (iv) manejo por oferta de forragem (kg MS/100 kg PC/dia). Protocolos com ofertas variáveis (≈8% na primavera; 12% nas demais estações) elevam a relação folha:colmo, o ganho individual (≈0,7 kg/animal/dia) e a produtividade por área (≈200 kg PC/ha/ano), enquanto massas de 1.400–1.500 kg MS/ha e lotações sazonais (≈380 kg PC/ha no período favorável; 160–180 kg PC/ha no inverno) otimizam o uso do pasto. Em sistemas bem manejados, a produção de forragem atinge 3.000 a 4.500 kg MS/ha/ano, com potencial de ~5.000 kg. Além disso, abordam-se benefícios da queima controlada. O manejo baseado em processos viabiliza intensificação sustentável, mantendo serviços ecossistêmicos e a identidade sociocultural do Pampa.

Palavras-chave: intensidade de pastejo, pastagem nativa, produtividade, serviços ambientais, tecnologias de processos.

1. Introdução

O Brasil destaca-se no cenário mundial da produção pecuária, com um rebanho de aproximadamente 197 milhões de bovinos e bubalinos, ocupando a posição de maior exportador de carne bovina (ABIEC, 2024). No país, as condições edafoclimáticas favoráveis e a disponibilidade de aproximadamente 161 milhões de hectares de pastagens (ABIEC, 2024) contribuem para que a produção animal seja majoritariamente realizada a pasto.

O estado do Rio Grande do Sul (RS) se destaca na pecuária nacional, possuindo o oitavo maior rebanho de bovinos e bubalinos do país, com 9,5 milhões de cabeças (ABIEC, 2024) e cerca de 9,1 milhões de hectares de pastagens (IBGE, 2020, 2021). Inserido na zona de clima subtropical, o estado caracteriza-se pela presença dos biomas Pampa e Mata Atlântica, sendo que aproximadamente 82% da produção pecuária ocorre em áreas de pastagens naturais (IBGE, 2020, 2021). Essas pastagens compreendem ecossistemas complexos, servindo de base para a exploração pecuária, bem como para a manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais, com destaque para a provisão de recursos hídricos, habitat para aves e mamíferos, além de suporte a agentes polinizadores (Pillar *et al.*, 2009; Overbeck *et al.*, 2015; Andrade *et al.*, 2023).

No RS, a pecuária de corte é desenvolvida, predominantemente, em áreas de pastagens naturais manejadas de forma extensiva, resultando em uma produtividade média de 60 a 70 kg PC/ha/ano (Nabinger *et al.*, 2009). Esse baixo desempenho produtivo tem contribuído para a conversão dessas áreas em lavouras. Estima-se que, atualmente, restam apenas 36% da área original de pastagens naturais (Trindade *et al.*, 2018). Neste contexto, torna-se inviável a manutenção da prática pecuária de forma extensiva, sem estratégias de intensificação sustentável.

Em ecossistemas pastoris naturais, a produtividade almejada deve estar vinculada a práticas de manejo duradouras, capazes de gerar benefícios econômicos ao produtor e, ao mesmo tempo, assegurar a manutenção dos serviços ecossistêmicos e a integridade do bioma (Cezimbra *et al.*, 2021). Assim, a adoção de estratégias sinérgicas surge como alternativa promissora, uma vez que permite conciliar maior rentabilidade com sustentabilidade, agregando

resiliência e estabilidade aos sistemas de produção (Carvalho *et al.*, 2021; Jaurena *et al.*, 2021).

Com uma flora diversificada, composta por 520 espécies de gramíneas e 250 espécies de leguminosas com potencial forrageiro (BoldrinI, 2009), as pastagens naturais, quando adequadamente manejadas, podem expressar elevado potencial produtivo. O ajuste da taxa de lotação e da oferta de forragem destacam-se como práticas capazes de manter a estrutura do pasto equilibrada e de favorecer a oferta de uma forragem de melhor composição bromatológica aos animais. Apesar da complexidade imposta pela diversidade de espécies, o uso de tecnologias de processo pode elevar a produtividade das pastagens naturais a patamares de 240 kg PC/ha/ano, aliado à sustentabilidade dos ecossistemas campestres (nabinger *et al.*, 2009). Dessa forma, o manejo adequado das pastagens naturais do Bioma Pampa configura-se como eixo central para compatibilizar a conservação da biodiversidade com o incremento da produtividade pecuária regional.

2. Desenvolvimento

2.1. Bioma Pampa

O bioma Pampa é uma formação campestre da América do Sul, abrangendo todo o Uruguai, o nordeste da Argentina, o sudeste do Paraguai e, no Brasil, está restrito ao Rio Grande do Sul, onde ocupa 2,3% do território nacional (IBGE, 2019). Com origem há cerca de 2,5 milhões de anos, no Período Quaternário, esse bioma resultou da interação entre fatores climáticos e geográficos que moldaram sua vegetação (Behling, *et al.*, 2009). Sua configuração atual é resultado da atividade pecuária, especialmente do pastejo, associada ao uso do fogo, os quais promoveram uma transformação na composição original da pastagem, resultando em um novo estágio biótico de clímax, caracterizado pela predominância de vegetação herbácea (Pillar e Quadros, 1997).

O Pampa ocupa 62% do território gaúcho (Cordeiro e Hasenack, 2009), caracterizando-se pelo relevo ondulado e pela paisagem em mosaico de campos e florestas, resultante do clima úmido (Behling *et al.*, 2009). É um ecossistema

de grande relevância ecológica e socioeconômica, por abrigar alta biodiversidade e sustentar sistemas agropecuários essenciais. As pastagens naturais representam a alternativa mais ecológica para a região Sul, permitindo a produção de alimentos saudáveis em condições diversas (Nabinger, 2006). Assim, o Pampa configura-se como espaço estratégico para conciliar produção animal e conservação ambiental, reforçando a importância de práticas de manejo sustentáveis e da valorização dos serviços ecossistêmicos associados à pecuária (Paludo *et al.*, 2020).

O Pampa abriga rica biodiversidade, com cerca de 5.358 espécies de fauna, incluindo 567 aves e 120 mamíferos, o que representa 9% da fauna nacional (Andrade *et al.*, 2023). Na flora, destacam-se aproximadamente 520 espécies de Poaceae e 250 de Fabaceae (Boldrini, 2009), confirmando a elevada biodiversidade existente em áreas de pastagens naturais.

Contudo, o Pampa não deve ser compreendido apenas como um ecossistema natural, caracterizado por sua vegetação e biodiversidade singulares, mas também como um espaço de significativa dimensão sociocultural, fundamental na formação da identidade do povo gaúcho (Bencke *et al.*, 2016). Além disso, constitui a base econômica da região, por concentrar grande parte da pecuária de corte desenvolvida no estado. Nesse contexto, é importante mencionar que a carne bovina produzida em áreas de pastagens naturais apresenta características diferenciadas, associadas ao perfil nutricional (Freitas *et al.*, 2014). Adicionalmente, estudos ressaltam que a atividade pecuária no Pampa, ao utilizar áreas de pastagens naturais, contribui não apenas para a oferta de alimentos, mas também para a manutenção de serviços culturais e regulatórios, como a preservação da paisagem, da identidade regional e da biodiversidade (Paludo *et al.*, 2020).

Apesar da importância do bioma Pampa em termos de potencial para a exploração da atividade pecuária e como fonte de biodiversidade, nos últimos 38 anos, houve uma redução de 32% de sua cobertura vegetal original, colocando-o entre os biomas que registraram as maiores perdas de áreas nas últimas décadas (Mapbiomas, 2023). As áreas de pastagens naturais vêm perdendo espaço para a expansão agrícola, principalmente com a implantação de lavouras, que ocupam atualmente 42% das áreas (Mapbiomas, 2023). Como

consequência, observa-se fragmentação da paisagem, perda de biodiversidade e erosão do solo, entre outros impactos (Carvalho *et al.*, 2009).

Dessa forma, o Pampa vem sendo progressivamente negligenciado subutilizado como recurso estratégico para uma pecuária sustentável. Uma das estratégias para preservar o bioma é a conscientização sobre o uso integrado, visando maior eficiência, produtividade e práticas de manejo sustentáveis (Pillar *et al.*, 2015). Nesse sentido, Paludo *et al.* (2020) destacam que a manutenção da pecuária familiar baseada em áreas de pastagens naturais fornece não apenas serviços de provisão (carne e lã), mas também serviços culturais e de regulação, reforçando a necessidade de políticas de Pagamento por Serviços Ambientais como incentivo à preservação. O uso consciente do bioma é indispensável para alcançar um equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental, assegurando a preservação da biodiversidade e da riqueza natural que caracterizam o Pampa.

2.2. Caracterização das áreas de pastagens naturais do bioma Pampa

As paisagens do bioma Pampa configuram-se como um mosaico expressivo em diferentes escalas espaciais. Em escala mais ampla, observa-se a ocorrência de formações florestais associadas ao clima úmido, intercaladas aos campos, muitas vezes submetidos a diferentes graus de antropização (Maraschin, 2009). Em escalas mais restritas, evidencia-se a coexistência de espécies de porte baixo e hábito prostrado com espécies de porte alto e hábito cespitoso, características da formação do “duplo estrato”, observado em áreas de ambiente campestre.

A compreensão das variações na estrutura das pastagens naturais é fundamental quando se introduzem ruminantes em áreas de pastejo, uma vez que tais diferenças influenciam diretamente a dinâmica de utilização e o potencial produtivo do ecossistema campestre. As espécies prostradas compõem o estrato inferior do campo, enquanto as cespitosas constituem o estrato superior (Pinto *et al.*, 2019). O estrato inferior é composto por espécies de hábito de crescimento prostrado e rápido, classificadas como espécies de captura de recursos, com alto valor nutritivo e maior resistência ao pastejo (Quadros *et al.*,

2009; Pinto *et al.*, 2019). Por outro lado, o estrato superior é composto por espécies de crescimento cespitoso, lento, que formam touceiras e são classificadas como de conservação de recursos, com baixo valor nutritivo e elevado acúmulo de material morto (Quadros *et al.*, 2009; Pinto *et al.*, 2019). Quando as touceiras representam mais de 35% da composição da área, passam a limitar a taxa de ingestão diária de matéria seca dos animais mantidos sob regime de pastejo (Pinto *et al.*, 2019).

As áreas de pastagens naturais do Pampa possuem uma flora peculiar, com destaque para as espécies vegetais pertencentes às famílias botânicas das gramíneas e leguminosas, com cerca de 520 espécies de gramíneas e 250 leguminosas com potencial forrageiro (Boldrini, 2009). As gramíneas formam a base da alimentação dos rebanhos, respondendo por 65 a 85% da massa de forragem disponível (Quadros *et al.*, 2009). As forrageiras encontradas no Pampa contemplam uma rara associação entre espécies classificadas, conforme o ciclo fotossintético, em C3 (com predominância no período hibernar) e C4 (mais expressivas no período estival). Nesse contexto, observa-se a prevalência de espécies C4 em relação às C3, uma vez que aquelas apresentam maior adaptação a condições de elevada luminosidade e temperatura, características do período de crescimento ativo das pastagens naturais (Nabinger *et al.*, 2000).

As gramíneas caracterizam-se por sua versatilidade, apresentando elevada resistência às pressões biológicas impostas pelo ambiente, sobretudo às variações no regime hídrico e aos efeitos antrópicos, como o uso do fogo e a presença de herbívoros (Boldrini *et al.*, 2006). Destaca-se o gênero *Paspalum*, que reúne 62 espécies com potencial forrageiro, sendo *Paspalum notatum* a espécie de maior relevância (Valls, 1987). Esse gênero contempla espécies e genótipos produtivos, adaptados às condições edafoclimáticas da região, algumas das quais já incorporadas a programas de melhoramento genético voltados ao desenvolvimento de cultivares comerciais (Machado *et al.*, 2024). No bioma Pampa, ainda se destacam *Andropogon lateralis*, *Axonopus affinis*, que, juntamente com *Paspalum notatum*, representam cerca de 40% da cobertura vegetal do bioma (Nabinger e Dall'agnol, 2019).

Com foco na produção animal, o ápice produtivo da vegetação nativa utilizada como forragem apresenta variações sazonais, concentrando-se, quase

integralmente, na estação quente. Esse comportamento compromete a produtividade anual das áreas de pastagens naturais que, quando manejadas exclusivamente com o uso de tecnologias de processos, apresentam rendimentos entre 3.000 e 4.500 kg de MS/ha/ano, alcançando, no máximo, uma taxa de acúmulo diário de forragem de 25 kg de MS/ha/dia (Rosa *et al.*, 2019).

A heterogeneidade do ecossistema permite aos animais consumirem uma dieta variada, tanto na composição de espécies forrageiras quanto no valor nutritivo. Esse fator é influenciado, principalmente, pela relação folha/colmo, que afeta as concentrações de nutrientes, a digestibilidade e, conseqüentemente, o desempenho animal. Indicadores como proteína bruta (PB), fibra em detergente neutro (FDN) e digestibilidade da matéria orgânica (DMO) são fundamentais para avaliar a qualidade da forragem e seus efeitos na nutrição dos ruminantes. Em estudo voltado à avaliação da composição bromatológica de espécies forrageiras nativas, foi observado PB mínimo de 5,3% em *Saccharum angustifolius* e máximo de 15,5% em *Paspalum urvillei*; FDN mínimo de 63,3% em *Axonopus affinis* e máximo de 80,5% em *Chascolytrum subaristatum*; DMO mínima de 28,2% em *Saccharum angustifolius* e máximo de 61,7% em *Paspalum urvillei* (Kuhn *et al.*, 2019).

A partir do exposto, evidencia-se que as pastagens naturais do Pampa configuram um ecossistema singular, cuja heterogeneidade sustenta a biodiversidade e a produção pecuária. O conhecimento sobre a composição botânica, o valor bromatológico e a dinâmica de uso das espécies é essencial para práticas de manejo que aliem conservação e eficiência produtiva.

2.3. Práticas de manejo e o impacto nos parâmetros de produção de forragem e produção animal

No RS, a pecuária é realizada, tradicionalmente, de forma extensiva, sob o método de pastoreio contínuo, com as pastagens naturais como o principal suporte para a produção pecuária (Nabinger *et al.*, 2000). Essas áreas enfrentam desafios, pois são utilizadas com taxas de lotação acima da capacidade de suporte, associadas à falta de nutrientes no solo, refletindo em produtividade média de 60 a 70 kg PC/ha/ano (Nabinger *et al.*, 2009).

Neste ecossistema, o pastejo é uma das principais atividades que contribuem para a manutenção das propriedades ecológicas e das características originárias e estruturais dos campos (Pillar e Quadros, 1997). Porém, o manejo inadequado, a partir do superpastejo, ocasiona uma redução significativa na cobertura vegetal e aumenta os riscos de erosão do solo. Além disso, promove a substituição de espécies forrageiras de alto rendimento por espécies menos produtivas e de qualidade inferior, podendo levar à extinção de espécies com elevado potencial forrageiro (Nabinger *et al.*, 2000). Por outro lado, na condição de subpastejo, caracterizada por uma taxa de lotação animal insuficiente, pode favorecer o domínio de gramíneas de porte cespitoso, com baixo valor nutritivo, ou de arbustos e outras espécies de baixa qualidade forrageira, como aquelas pertencentes aos gêneros *Baccharis* e *Eryngium* (Nabinger *et al.*, 2000). Essa condição pode resultar no acúmulo de material senescente nas touceiras, comprometendo a qualidade do pasto (Pinto *et al.*, 2019).

Dessa forma, a estrutura do pasto está diretamente relacionada às práticas de manejo adotadas, que moldam a pastagem de modo a favorecer a seleção da dieta pelos animais e, conseqüentemente, otimizar a conversão da forragem em produto animal. Entre as práticas de manejo que priorizam o uso de tecnologias de processo, destacam-se o ajuste da taxa de lotação e a oferta de forragem, que atuam na modulação dos estratos que compõem as pastagens naturais (Pinto *et al.*, 2019). A adoção dessas estratégias promove uma estrutura mais equilibrada de pastagem e melhora a qualidade da forragem. Embora a diversidade de espécies torne o manejo mais complexo, práticas específicas podem elevar a produção de forragem, melhorar a conversão em produto animal e promover a sustentabilidade do sistema. Em síntese, a definição de metas operacionais (por exemplo, lotação compatível com a capacidade de suporte e monitoramento da altura do dossel e da proporção de folhas/touceiras) é decisiva para transformar estrutura de pasto em desempenho zootécnico e ecológico.

2.3.1. Tipologia funcional como ferramenta auxiliar no manejo de pastagens naturais

A tipologia funcional constitui uma ferramenta importante para o manejo de pastagens naturais, pois permite o agrupamento de espécies com funções ecológicas semelhantes, favorecendo uma compreensão mais aprofundada das interações entre a vegetação e o ambiente (Lavorel e Garnier, 2002). No caso das gramíneas, esse agrupamento pode ser realizado com base em atributos foliares, como o teor de matéria seca e a área foliar específica, sendo as espécies classificadas nas tipologias funcionais “A”, “B”, “C” e “D” (Quadros *et al.*, 2009). Essa abordagem metodológica simplifica o manejo dessas áreas, uma vez que o elevado número de espécies dificulta a obtenção de respostas precisas em avaliações individuais (Quadros *et al.*, 2009).

A tipologia funcional “A” engloba espécies de porte prostrado e adaptadas a condições de pastejo mais intensivo, com destaque para as espécies: *Axonopus affinis*, *A. argentinus*, *Dichanthelium sabulorum*, *Paspalum notatum*, *P. pumilum*. São plantas de captura de recursos, em razão da sua capacidade de utilizar de forma eficiente os recursos ambientais, promovendo rápida ciclagem de nutrientes e componentes estruturais do dossel. Caracterizam-se por apresentar maior área foliar específica ($>20 \text{ m}^2/\text{kg}$), menor teor de matéria seca ($<300 \text{ g/kg}$) e maior valor nutricional. No entanto, em sistemas de pastejo contínuo, sem o devido ajuste da taxa de lotação, ocorre intensificação da desfolha, resultando em folhas menores e de reduzida longevidade (Quadros *et al.*, 2009).

As espécies pertencentes à tipologia funcional “B” apresentam menor área foliar específica ($14 \text{ a } 16 \text{ m}^2/\text{kg}$) e maiores teores de matéria seca ($300 \text{ a } 400 \text{ g/kg}$), quando comparadas às espécies pertencentes à tipologia funcional “A”. As espécies da tipologia funcional “B” são classificadas como de captura de recursos e tolerantes ao pastejo intensivo, apresentando hábitos de crescimento prostrado ou cespitoso e capacidade de alterar sua morfologia conforme o ambiente. Destacam-se *Andropogon lateralis*, *A. selloanus*, *A. ternatus*, *Coelorachis selloana*, *Paspalum notatum*, *P. plicatulum* e *Schizachyrium microstachyum*. *Paspalum notatum* pode ser enquadrado na tipologia “A” sob maior intensidade de desfolha, e na tipologia “B” em condições de menor

intensidade, quando perde competitividade frente a espécies cespitosas (Quadros *et al.*, 2009).

A tipologia funcional “C” é composta por espécies que apresentam menor área foliar específica (8 a 12 m²/kg) e maior teor de matéria seca (400 a 500 g/kg), quando comparadas às espécies que compõem a tipologia funcional “B”. São espécies de conservação de recursos e que formam touceiras, tais como, *Andropogon lateralis*, *Erianthus* spp, *Piptochaetium montevidense*, *Paspalum plicatulum*, *Piptochaetium stipoides*, *Sporobolus indicus*, *Stipa* spp. *Andropogon lateralis* é uma espécie que apresenta respostas diferentes quanto à sua adaptação a recursos ambientais ou ao manejo e, assim, pode ser enquadrada nas tipologias funcionais “B” (hábito de crescimento mais prostrado) ou “C” (hábito de crescimento cespitoso, formando touceiras).

Por fim, o último grupo, representado pela tipologia funcional “D”, é composto por espécies que formam touceiras mais densas, devido ao grande acúmulo de matéria vegetal morta. Nesse grupo destacam-se as espécies *Aristida laevis*, *A. phyllifolia*, *A. venustula*, *Erianthus* spp, *Piptochaetium montevidense*, *Sorghastrum* spp. O grupo possui espécies adaptadas a condições ambientais com recursos mais limitantes, sendo caracterizadas como plantas de conservação de recursos, apresentando menor área foliar específica (<8 m²/kg) e maior teor de matéria seca (>500 g/kg), quando comparadas às demais tipologias funcionais. Além disso, possuem menor valor nutricional e são menos adaptadas ao pastejo intensivo, podendo ser reduzidas ou suprimidas quando submetidas a altas taxas de lotação animal (Quadros *et al.*, 2009). Diante do exposto, a tipologia funcional é uma ferramenta auxiliar que facilita o manejo das pastagens naturais, pois orienta estratégias conforme a estrutura do pasto, sem exigir a identificação individual taxonômica das espécies; em termos operacionais, a leitura da tipologia do dossel permite ajustar lotação, intensidade de desfolha e metas de altura, antecipando respostas do pasto e do desempenho animal.

2.3.2. Diferimento

O diferimento é uma técnica de manejo que consiste em suspender o pastejo de uma área por um determinado período de tempo (Nabinger *et al.*, 2009; Quadros *et al.*, 2019). Essa prática de manejo, permite o acúmulo de forragem, a recuperação de áreas superpastejadas e favorece o florescimento para a formação de banco de sementes e ressemeadura natural. Além disso, promove serviços ecossistêmicos, tais como proteção do solo e aumento da matéria orgânica, contribuindo para sistemas mais sustentáveis (Fedrigo *et al.*, 2022).

O diferimento pode ser aplicado em diferentes épocas do ano e em áreas submetidas a distintas intensidades de pastejo. Quando realizado na primavera, tem o propósito de priorizar o acúmulo de forragem para utilização durante o verão, sendo uma prática especialmente indicada em regiões com histórico de verões secos. Quando realizado no período de outono, visa o acúmulo de forragem para ser utilizado durante a estação de inverno. Contudo, estudos indicam que os melhores resultados são obtidos quando essa prática é realizada em áreas previamente superpastejadas (Sampson, 1951). Nessas áreas, o diferimento promove um rearranjo funcional da composição botânica, atuando na recuperação da área degradada (Fedrigo *et al.*, 2022; Quadros *et al.*, 2019). De acordo com Nabinger *et al.* (2009), o diferimento de primavera favorece a produção de sementes de espécies de inverno, tais como, *Chascolytrum* spp., *Bromus catharticus*, *B. auleticus*, *Trifolium polimorphum*, *Adesmia* spp., entre outras. Segundo os autores, espécies estivais que tem o florescimento no final da estação de primavera, tais como algumas espécies pertencentes ao gênero *Paspalum* como *P. notatum*, *P. dilatatum*, *P. lepton* e *P. urvillei* também podem ser beneficiadas com a formação de bancos de sementes e ressemeadura natural.

Estudos demonstram que o diferimento de áreas realizado no outono favorece o desenvolvimento radicular, resultando em um incremento de 35% na biomassa de raízes em profundidades superiores a 10 cm (Rodrigues *et al.*, 2010). Resultados positivos da prática de diferimento em áreas com histórico de superpastejo foram observados com efeitos benéficos no acúmulo de biomassa aérea e subterrânea (Ataide, 2015; Fedrigo *et al.*, 2022). Em situações de manejo

a partir de ofertas de forragem (4% e 8% - 12% de forragem) em uma área de pastagem natural do bioma Pampa, na condição de diferimento por um período de 90 dias ou mantida sob pastejo, observou-se que a intensidade de pastejo, justificada pelas ofertas de forragem, exerce efeito na resposta na produção de forragem, esteja associada ou não ao uso do diferimento, independentemente da estação do ano (Tabela 1).

Tabela 1. Produção de biomassa aérea em pastagem natural do bioma Pampa diferida ou mantida sob pastejo nas estações de primavera e outono, em função das ofertas de forragem de 4% e 8-12%.

Práticas de manejo	Produção de biomassa (kg de MS/ha)	
	Ofertas de forragem	
	4%	8 - 12%
Área diferida na primavera	1.272	2.407
Área não diferida na primavera	300,5	2.199
Área diferida no outono	991	2.252
Área não diferida no outono	695,5	2.393

Fonte: adaptado de Quadros *et al.* (2019).

Os resultados indicam que áreas manejadas sob baixa oferta de forragem apresentam os menores acúmulos de biomassa, enquanto o manejo com ofertas de forragem variáveis ao longo do ano e o uso do diferimento são práticas que promovem maiores produções de forragem.

2.3.3. Taxa de lotação animal

A taxa de lotação animal é definida a partir da relação entre quilos de peso corporal animal por unidade de área (kg de peso corporal/ha). O uso dessa tecnologia de processo como ferramenta de manejo é fundamental, pois possibilita que as áreas de pastagens sejam manejadas a partir de sua

capacidade de suporte. No estado do Rio Grande do Sul, a produtividade animal anual em áreas de pastagens naturais é baixa, em média de 60 a 70 kg PC/ha/ano (Nabinger *et al.*, 2009), o que é reflexo do manejo inadequado, associado à manutenção de altas taxas de lotação animal e à ausência de investimentos em práticas que envolvem o uso de tecnologias de processo e de insumos.

Nesse contexto, muitos estudos foram desenvolvidos em diferentes regiões do mundo com o propósito de avaliar o efeito de distintas taxas de lotação sobre o desempenho animal individual e por unidade de área. Desde os primórdios, esses estudos têm sido conduzidos com o propósito de identificar a taxa de lotação ótima, definida como uma faixa de manejo que possibilita manter uma relação equilibrada entre o desempenho individual dos animais e a produtividade por unidade de área, o que impacta, consequentemente, em melhor retorno financeiro. Essa é a premissa da contribuição científica de Mott (1960), ao afirmar que as pastagens devem ser manejadas dentro de uma faixa de amplitude ótima e, para isso, é necessário manter o equilíbrio entre o número de animais e a forragem disponível, isto é, adequar a pressão de pastejo que, atualmente, é referenciada a partir da oferta de forragem (kg de MS/100 kg PC/dia).

Segundo Blaser *et al.* (1983), a adoção de taxas de lotação fixas ao longo do ano desconsidera as variações na produção de forragem, as quais estão diretamente relacionadas aos fatores que determinam a estrutura do pasto e a composição bromatológica da forragem. Essa limitação é especialmente relevante no manejo das pastagens naturais do bioma Pampa, caracterizadas por elevada heterogeneidade e alta biodiversidade, que resultam na formação de distintas estruturas do pasto. Nessas condições, torna-se praticamente inviável a aplicação de uma mesma taxa de lotação de forma uniforme em diferentes áreas.

Estudos avaliando o desempenho de novilhos manejados em áreas de pastagens naturais do Pampa, a partir do método de pastoreio contínuo, associado a uma taxa de lotação fixa ao longo do ano, obtiveram produtividades por área entre 95,2 e 118 kg/ha/ano, associadas a perdas de peso entre 11 e 27 kg/ha/ano, respectivamente (Grossman, 1956 *apud* Moojen, 1991; Grossman e

Mordieck, 1956 *apud* Nabinger, 2006). Em condição, na qual a lotação animal foi ajustada com base em uma oferta de forragem fixa ao longo do ano, equivalente a 12% do peso corporal, alcançou-se uma produtividade de 140 kg PC/ha/ano, demonstrando que é possível duplicar a produtividade em relação à média do estado (Nabinger *et al.*, 2009; Nabinger e Jacques, 2019).

Estudos mais atuais confirmam que é necessário que o ajuste na taxa de lotação seja realizado periodicamente, em função da disponibilidade de pasto ao longo do ano. Em momentos em que as condições climáticas são favoráveis a maiores produções de forragem, a taxa de lotação deve aumentar, assim como em condições adversas a taxa de lotação animal deve diminuir (Nabinger *et al.*, 2009). Essas flutuações na produção de forragem ao longo do ano impactam diretamente o desempenho individual dos animais e a produtividade por unidade de área. Nessa perspectiva, evidenciou-se que maiores incrementos de produtividade animal podem ser alcançados quando a taxa de lotação passa a ser consequência da oferta de recursos disponibilizados pelo ambiente (Carvalho *et al.*, 2007).

Dessa forma, o manejo da taxa de lotação deve ser visto como um processo dinâmico que integra oferta de forragem, ambiente e resposta animal. Nas pastagens naturais do Pampa, essa prática aumenta a produtividade e a eficiência de uso do pasto, conciliando sustentabilidade, conservação da biodiversidade e retorno econômico.

2.3.4. Oferta de forragem

A oferta de forragem (kg de MS/100 kg de peso corporal/dia), é definida como a relação entre a quantidade de pasto e a quantidade de peso corporal animal (Wallau *et al.*, 2019). Essa métrica possibilita ajustar a disponibilidade de forragem à taxa de lotação animal e, consequentemente, fornece uma indicação direta da quantidade de alimento efetivamente disponibilizada aos animais. Apesar do avanço obtido com o uso da oferta de forragem como ferramenta de manejo, é importante destacar que, ela não fornece informações a respeito da estrutura do pasto, ou seja, a forma como o pasto será disponibilizado aos animais (Carvalho *et al.*, 2007).

Essa tecnologia de processo foi testada em um protocolo de longa duração em pastagem natural do bioma Pampa, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Inicialmente, optou-se pelo uso de ofertas de forragem fixas ao longo do ano de 4%, 8%, 12% e 16% (kg de MS/100 kg PC/dia) com o intuito de avaliar a produção de forragem e o desempenho animal. Os melhores resultados para desempenho por área e por animal foram observados em ofertas de forragem de 11,5% e 13,6% (Maraschin, 2001). A taxa média máxima de acúmulo diário de forragem foi de 16,3 kg de MS/ha/dia, observada na oferta de forragem que possibilitou o maior desempenho individual dos animais, correspondendo a uma massa de forragem do estrato inferior entre 1.400 e 1.500 kg de MS/ha, com uma taxa de lotação animal de 380 kg PC/ha (Maraschin, 2001).

Nessa linha, os estudos avançaram com a inclusão de um novo tratamento ao protocolo experimental, prevendo o uso de ofertas de forragem variáveis ao longo do ano. Essa abordagem baseia-se na premissa de que a produção animal resulta não apenas do manejo aplicado, mas também das condições a que o pasto foi submetido anteriormente (Armstrong *et al.*, 1995).

O tratamento foi manejado a partir da oferta de forragem de 8% (estação de primavera) e 12% nas demais estações do ano, de forma a favorecer alta relação folha/colmo, baixa participação de material senescente, entre outros atributos estruturais (Soares, 2002). Essa condição favorece a disponibilidade de forragem com maior qualidade ao longo da estação quente do ano (nabinger, 2006). No presente estudo, foi obtido ganho médio diário de 0,7 kg PC/animal/dia e produtividade por área de 200 PC/ha/ano (Soares *et al.*, 2005). Durante o período favorável de crescimento das pastagens naturais (primavera, verão e outono), foi possível manter uma taxa de lotação de 380 kg PC/ha, havendo a necessidade de redução para 160-180 kg PC/ha durante o período de inverno (SOARES *et al.*, 2005). Os parâmetros do pasto e da produção animal resultantes do uso de distintas ofertas de forragem podem ser observados na Tabela 2.

Como síntese, tem-se que uma baixa oferta de forragem limita a produção de forragem em áreas de pastagens naturais do bioma Pampa, bem como a manutenção de ofertas de forragem de média a alta promove o acúmulo de

forragem ao longo da estação fria (Rosa *et al.*, 2019). Segundo as autoras, as áreas de pastagens naturais do Pampa têm o potencial de produção de forragem de 5.000 kg de MS/ha/ano, com a indicação do manejo realizado com a oferta de forragem variável ao longo do ano (8-12%). Esses resultados evidenciam que o manejo da oferta de forragem, quando ajustado de forma dinâmica ao longo do ano, constitui uma estratégia eficiente para conciliar desempenho animal, produtividade por área e qualidade da pastagem em sistemas baseados em ecossistemas campestres do Pampa.

Tabela 2. Parâmetros de produção de forragem e de produção animal em área de pastagem natural do bioma Pampa submetida a distintas ofertas de forragem.

Parâmetros avaliados	Estações do ano e ofertas de forragem				Média / Total
	Primavera (8%)	Verão (12%)	Outono (12%)	Inverno (12%)	
Taxa de acúmulo diário de forragem (kg/ha/dia)	10,9	13,7	6,3	5,7	9,1
Massa de forragem (kg de MS/ha)	979	1.179	1.883	1.390	1.357
Taxa de lotação animal (kg de peso corporal/ha)	479	399	429	352	414
Ganho de peso por animal (kg/dia)	0,780	0,677	0,283	0,178	0,447
Ganho de peso por área (kg/ha)	116	82	27,5	17,9	243,4*

*Ganho de peso por área, refere-se ao valor total obtido ao longo do ano.

Fonte: adaptado de Soares *et al.* (2005).

2.3.5. Uso de queima controlada

O fogo é um fator determinante na estrutura vegetacional e no funcionamento ecossistêmico dos campos naturais, promovendo alterações na composição botânica e, conseqüentemente, na qualidade da forragem disponível (Allred *et al.*, 2011; Vermeire e Russell, 2018). Contudo, apesar do bioma Pampa ser um ecossistema dependente do fogo (Pivello *et al.*, 2021), a difusão e a adoção do fogo como ferramenta estratégica de manejo pastoril

permanecem limitadas. Essa restrição é atribuída, majoritariamente, ao desconhecimento dos benefícios ecológicos e produtivos da queima controlada e, fundamentalmente, aos equívocos nas interpretações de resultados de pesquisas científicas, o que limita os avanços no manejo forrageiro dos campos nativos da região (Quadros e Pillar, 2001; Overbeck *et al.*, 2018).

Tradicionalmente, a queima dos campos do Pampa é realizada, majoritariamente, no fim inverno, visando remover a biomassa vegetal morta e estimular o rebrote de primavera (Overbeck *et al.*, 2018). Este manejo proporciona uma melhora transitória na palatabilidade e qualidade forrageira da pastagem. Araújo (1971) reportou que diversas espécies de gramíneas nativas de hábito cespitoso-ereto (e.g., *Saccharum angustifolium* Nees, *Aristida laevis* (Nees) Kunth e *Paspalum exaltatum* J.Presl) são pastejadas apenas durante o rebrote pós-fogo, sendo preteridas pelos herbívoros à medida que se desenvolvem. Isto pode ser atribuído à melhora nutricional do rebrote (plantas jovens) que, segundo Fontaneli e Jacques (1988), apresenta maiores teores de proteína bruta durante três meses após a queima na comparação com áreas sem fogo. Ademais, mesmo não observando melhora no teor de proteína bruta, Damé *et al.* (1997) observaram melhora da qualidade nutritiva através do aumento da digestibilidade *in vitro* da matéria orgânica, indicando o potencial da queima controlada na otimização do consumo e valor nutricional da forragem disponível.

O fogo também pode ser empregado como forma de reduzir a abundância de subarbustos de baixa qualidade forrageira (*Baccharis crispa* Spreng; “carqueja”) e com potencial hepatotóxico para ruminantes domésticos (*Senecio heterotrichius* DC.; “maria-mole”), conforme resultados obtidos por Furquim *et al.* (2024). Os autores observaram também que a queima do campo nativo no fim do inverno, seguida de diferimento de primavera, pode ser uma estratégia para melhorar a qualidade do pasto a partir do aumento da abundância de gramíneas nativas C3 – cuja qualidade forrageira é maior em comparação às gramíneas nativas C4. Tais benefícios, além de reduzir os custos de produção, facilitam a adoção do uso do fogo pelos pecuaristas, sendo uma forma de promover a manutenção da pecuária baseada em campos naturais no Pampa.

3. Considerações finais

Nos últimos anos, a pecuária tem enfrentado desafios que demandam uma abordagem integrada e sustentável, reforçando a importância da utilização de áreas de pastagens naturais como base produtiva. Esse modelo assegura a oferta de produtos diversificados, alinhados aos padrões de sustentabilidade e conservação ambiental. O campo nativo, sob mínima ou, por vezes, nenhuma intervenção, demonstra capacidade de sustentar a produção animal, ainda que com baixas produtividades, em função da sua complexa estrutura ecológica e da adaptação das espécies que o compõem. Nesse sentido, a consolidação das tecnologias de processos discutidas neste capítulo representa um avanço estratégico ao integrar o conhecimento sobre a dinâmica e o funcionamento das pastagens naturais em práticas de manejo que promovem estabilidade, uso racional dos recursos e incremento produtivo. Nesse contexto, o futuro da pecuária no bioma Pampa depende do reconhecimento do valor ecológico e produtivo de seus campos e da adoção de ferramentas que ampliem a eficiência e a produção animal. Portanto, o desafio está em compreender, aperfeiçoar e potencializar os processos que já garantem sua singularidade e capacidade de sustentar sistemas pecuários resilientes e duradouros.

4. Referências bibliográficas

- ABIEC - Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes. <https://abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2024-perfil-da-pecuaria-no-brasil/> Acessado 13 de setembro 2025.
- ALLRED, Brady *et al.* Ungulate preference for burned patches reveals strength of fire–grazing interaction. *Ecology And Evolution*, v.1 n. 2, p. 132-144, 2011. <https://doi.org/10.1002/ece3.12>.
- ANDRADE, Bianca *et al.* 12,500+ and counting: biodiversity of the Brazilian Pampa. **Frontiers Of Biogeography**, v. 15 n. 2, e5928, 2023. <https://doi.org/10.21425/F5FBG59288>.
- ARAÚJO, A. D. **Principais gramíneas do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Sulina, 1971. 255 p.
- ARMSTRONG, Robert *et al.* The effect of sward height and its direction of change on the herbage intake, diet selection and performance of weaned lambs grazing ryegrass swards. **Grass And Forage Science**, v. 50, n. 4, p. 389-398, 1995. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1995.tb02333.x>.

- ATAIDE, Paulo. **Biomassa subterrânea da pastagem natural sob intensidades de pastejo contrastantes e submetida a diferimentos**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2015.
- BEHLING, Hermann *et al.* Dinâmica dos campos no sul do Brasil durante o Quaternário Tardio. In: PILLAR, Valério; MÜLLER, Sandra; CASTILHOS, Zélia; JACQUES, Aino. (ed.). **Campos Sulinos – conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2009. p. 13-25.
- BENCKE, Glayson A.; CHOMENKO, Luísa; SANT'ANNA, Danilo M. O que é o Pampa? In: CHOMENKO, Luísa; BENCKE, Glayson (ed.). **Nosso Pampa Desconhecido**. Porto Alegre: Fundação Zoobotânica do Rio Grande do Sul. p. 17-27, 2016.
- BLASER, Roy *et al.* Animal production with controlled and fixed stocking and managed stocking rates. In: XIV International Grassland Congress, 1 ed., 1983, Lexington, Kentucky, USA. **Anais eletrônicos...** Lexington: Routledge, 1983. p. 15-24. <https://doi.org/10.1201/9780429303142>.
- BOLDRINI, Ilsi. A flora dos campos do Rio Grande do Sul. In: PILLAR, Valério; MÜLLER, Sandra; CASTILHOS, Zélia; JACQUES, Aino. (ed.). **Campos Sulinos – conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, p. 63 - 77, 2009.
- BOLDRINI, Ilsi. Biodiversidade dos Campos Sulinos. In: **I Simpósio de Forrageiras e Produção Animal**, 1 ed., 2006, Porto Alegre, Brasil. Anais eletrônicos... Porto Alegre: UFRGS, p. 11-24, 2006. <http://hdl.handle.net/10183/293690>. Acessado: 22 set. 2025.
- CARVALHO, Paulo *et al.* Land-use intensification trends in the Rio de la Plata region of South America: toward specialization or recoupling crop and livestock production. **Frontiers Of Agricultural Science And Engineering**, v. 8, n. 1, 2021. 97-110. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2020380>.
- CARVALHO, Paulo. *et al.* Consumo de forragem por animais em pastejo: analogias e simulações em pastoreio rotativo. In: **Simpósio sobre Manejo da Pastagem - Intensificação de sistemas de produção animal em pastos**, 25., 2009, Piracicaba. Anais eletrônicos... Piracicaba: FEALQ, 2009. https://www.researchgate.net/profile/TeresaGenro/publication/284470594_Consumo_de_forragem_por_animais_em_pastejo_Analogias_e_simulacoes_em_pastoreio_rotativo/links/5655de6008ae4988a7b2eca5/Consumo-de-forragem-por-animais-em-pastejo-Analogias-e-simulacoes-em-pastoreio-rotativo.pdf. Acessado: 13 set. 2025.
- CARVALHO, Paulo; SANTOS, Davi; NEVES, Fabio. Oferta de forragem como condicionadora da estrutura do pasto e do desempenho animal. In: DALL'AGNOL, Miguel; NABINGER, Carlos; SANTANA, Danilo; SANTOS, Rogério (ed.). **Sustentabilidade Produtiva do Bioma Pampa**. Porto Alegre: Formato Artes Gráficas, 2007. p. 23-60.

- CEZIMBRA, Ian *et al.* Potential of grazing management to improve beef cattle production and mitigate methane emissions in native grasslands of the Pampa biome. **Science Of The Total Environment**, v. 780: 146582, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146582>.
- CORDEIRO, José; HASENACK, Heinrich. Cobertura vegetal atual do Rio Grande do Sul. In: PILLAR, Valério; MÜLLER, Sandra; CASTILHOS, Zélia; JACQUES, Aino. (ed.). **Campos Sulinos – conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2009. p. 285-299.
- DAMÉ, Paulo *et al.* Efeitos da queima seguida de pastejo ou diferimento sobre a produção, qualidade, cobertura do solo e sistema radicular de uma pastagem natural. **Ciência Rural**, v. 27, n. 1, p.133-137, 1997.
- FEDRIGO, Jean *et al.* Deferment associated to contrasting grazing intensities affects root/shoot biomass allocation in natural grasslands. **Applied Vegetation Science**, v. 25, n. 3, e12671, 2022. <https://doi.org/10.1111/avsc.12671>
- FONTANELI, Renato; Jacques, Aino. Melhoramento de pastagem natural: ceifa, queima, diferimento e adubação. **Revista Brasileira De Zootecnia**, v. 17, n. 12, p. 180-94, 1988.
- FREITAS, Aline *et al.* Nutritional composition of the meat of Hereford and Braford steers finished on pastures or in a feedlot in southern Brazil. **Meat Science**, v. 96, n. 1, p.353-360, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.07.021>.
- FURQUIM, Fernando; SCASTA, John; OVERBECK, Gerhard. Interactive effects of fire and grazing on vegetation structure and plant species composition in subtropical grasslands. **Applied Vegetation Science**, v. 27, n. 3, e12800, 2024. <https://doi.org/10.1111/avsc.12800>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://www.ibge.gov.br/> Acessado: 6 de setembro 2025.
- JAURENA, Martín *et al.* Native grasslands at the core: a new paradigm of intensification for the campos of Southern South America to increase economic and environmental sustainability. **Frontiers In Sustainable Food Systems**, v. 5: 547834, 2021. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.547834>.
- KUHN, Joana *et al.* **NATIVÃO: + de 30 Anos de Pesquisa em Campo Nativo**. Porto Alegre: UFRGS, p. 21-22, 2019.
- LAVOREL, Sandra; GARNIER, Eric. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. **Functional Ecology**, v. 16, n. 5, p. 545–556, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2002.00664.x>.
- MACHADO, Juliana *et al.* Gênero *Paspalum*: potencialidades e perspectivas futuras. In: DEL VALLE, Tiago; STEFANELLO, Catarina; AZEVEDO, Eduardo (ed.). **II Simpósio de investigação em produção animal**. Canoas: Mérida Publishers, p. 87-116, 2024.

- MAPBIOMAS. <https://brasil.mapbiomas.org/en/>. Acessado: 3 de setembro 2025.
- MARASCHIN, Gerzy. Manejo do campo nativo, produtividade animal, dinâmica da vegetação e adubação de pastagens nativas do sul do Brasil. *In*: PILLAR, Valério; MÜLLER, Sandra; CASTILHOS, Zélia; JACQUES, Aino. (ed.). **Campos Sulinos – conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, p. 248-259, 2009.
- MARASCHIN, Gerzy. **Production potential of South American grasslands**. *In*: **International Grassland Congress**, 2001, Piracicaba, Brasil. Anais eletrônicos... Piracicaba: FEALQ, p. 5-15, 2001. <https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3960&context=igc>. Acessado 10 set. 2025.
- MOOJEN, Eduardo. **Dinâmica e potencial produtivo de uma pastagem nativa do Rio Grande do Sul submetida a pressões de pastejo, épocas de diferimento e níveis de adubação**. Tese de Doutorado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1991.
- MOTT, Gerald. **Grazing pressure and the measurement of pasture production**. *In*: **Proceedings of the Eighth International Grassland Congress**, 11., 1960, Lafayette, Indiana, USA. Anais eletrônicos... Lafayette: Cabi Digital Library, p. 606-611, 1960. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19610700113>. Acessado: 12 set. 2025.
- NABINGER, C.; DALL'AGNOL, M. **Guia para reconhecimento de espécies dos campos sulinos**. 2. ed. Brasília: Ibama, 132 p, 2019.
- NABINGER, Carlos; JACQUES, Aino. A Questão da Produção Pecuária em Campo Nativo do Bioma Pampa: Contexto Geral. *In*: CARVALHO, Paulo; WALLAU, Marcelo; BREMM, Carolina; BONNET, Olivier; TRINDADE, Júlio; ROSA, Fabiane; FREITAS, Thainá; MOOJEN, Fernanda; NABINGER, Carlos (ed.). **NATIVÃO: + de 30 Anos de Pesquisa em Campo Nativo**. Porto Alegre: UFRGS, p. 1-6, 2019.
- NABINGER, Carlos. *et al.* Produção animal com base no campo nativo: aplicações de resultados de pesquisa. *In*: PILLAR, Valério; MÜLLER, Sandra; CASTILHOS, Zélia; JACQUES, Aino. (ed.). **Campos Sulinos – conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, p. 175-198, 2009.
- NABINGER, C. Manejo e produtividade das pastagens nativas do subtropico brasileiro. *In*: Simpósio de forrageiras e produção animal. Ênfase: Importância e potencial produtivo da pastagem nativa, 1., 2006, Porto Alegre, Anais eletrônicos... Canoas: ULBRA, p. 25- 75, 2006. https://www.researchgate.net/publication/262876438_Manejo_e_Produtividade_das_Pastagens_Nativas_do_Subtropica_Brasileiro. Acessado: 13 set. 2025.

- NABINGER, Carlos; MORAES, Anibal; MARASCHIN, Gerzy. Campos in Southern Brazil. *In: LEMAIRE, G. et al. (ed.). **Grassland ecophysiology and grazing ecology***. Wallingford: CABI 452 Publishing, p. 355-376, 2000.
- Overbeck, Gerhard *et al.* The South Brazilian grasslands – A South American tallgrass prairie? Parallels and implications of fire dependency. **Perspectives In Ecology And Conservation**, v. 16, n. 1, p. 24-30, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.11.002>
- OVERBECK, G. E.; PODGAISKI, L. R.; Muller, S. C. Biodiversidade dos campos. *In: PILLAR, Valério; LANGE, O. (ed.). **Os campos do sul***. Porto Alegre: Rede Campos Sulinos UFRGS, p. 43-49, 2015.
- OVERBECK, G. E. et al. **Biodiversidade dos campos**. *In: Os Campos do Sul*. Porto Alegre, p.192, 2015.
- PALUDO, Leticia; VARGAS, Adriana; SILVEIRA, Vicente. Ecosystem services and production systems of family cattle farms: an analysis of animal production in Pampa Biome. **Revista Brasileira De Zootecnia**, v. 41, n. 2, p. 661-667, 2020. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2020v41n2p661>.
- PILLAR, V. P.; LANGE, O. **Os Campos do Sul: ecologia e manejo de pastagens nativas**. Porto Alegre: Rede Campos Sulinos – UFRGS, 2015. 192 p.
- PILLAR, V. P. *et al.* **Campos Sulinos: Conservação e Uso Sustentável da Biodiversidade**. Brasília: MMA, 403 p. 2009.
- PILLAR, Valério.; QUADROS, Fernando. Grassland-forest boundaries in Southern Brazil. **Coenoses**, v. 12, n. 2:3, p. 119–126, 1997. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8722-9_17.
- PINTO, Cassiano *et al.* **NATIVÃO: + de 30 Anos de Pesquisa em Campo Nativo**. Porto Alegre: UFRGS, p. 16-20, 2019.
- PIVELLO, Vânia R. *et al.* Understanding Brazil's catastrophic fires: causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives In Ecology And Conservation**, v. 19, n. 3, p. 233–255, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.06.005>.
- QUADROS, Luis *et al.* Diferimento: manejando a estrutura e a composição botânica da vegetação. *In: CARVALHO, Paulo; WALLAU, Marcelo; BREMM, Carolina; BONNET, Olivier; TRINDADE, Júlio; ROSA, Fabiane; FREITAS, Thainá; MOOJEN, Fernanda; NABINGER, Carlos (ed.). **NATIVÃO: + de 30 Anos de Pesquisa em Campo Nativo***. Porto Alegre: UFRGS, p. 29-31, 2019.
- QUADROS, Fernando; TRINDADE, José; BORBA, Marcos. Abordagem funcional da ecologia campestre como instrumento de pesquisa e apropriação do conhecimento pelos produtores rurais. *In: PILLAR, Valério; MÜLLER, Sandra Cristina; CASTILHOS, Zélia Maria; JACQUES, Aino (ed.).*

Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, p. 206–213, 2009.

QUADROS, Fernando; PILLAR, Valério. Dinâmica vegetacional em pastagem natural submetida a tratamentos de queima e pastejo. **Ciência Rural**, v. 31, n. 5, p. 863-868, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782001000500020>

RODRIGUES, Cristina *et al.* **Avaliação do sistema radicular e de rizomas de um campo natural diferido em Bagé, RS.** Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 10. 1. ed. Campinas: Embrapa, 17 p., 2010.

ROSA, Fabiane *et al.* **NATIVÃO: + de 30 Anos de Pesquisa em Campo Nativo.** Porto Alegre: UFRGS, p. 23-25, 2019.

SAMPSON, Arthur W. A symposium on rotation grazing in North America. **Journal Of Range Management**, v. 4, n. 1, p. 19–23, 1951. <https://doi.org/10.2307/3894427>.

SOARES, André *et al.* Produção animal e de forragem em pastagem nativa submetida a distintas ofertas de forragem. **Ciência Rural**, v. 35, n. 5, p. 1148–1154, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000500025>.

SOARES, André. **Efeito da alteração da oferta de matéria seca de uma pastagem natural sobre a produção animal e a dinâmica da vegetação.** Tese de Doutorado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2002.

TRINDADE, J. P.; ROCHA, D. S.; VOLK, L. B. S. **Uso da terra no Rio Grande do Sul: ano de 2017.** 1. ed. Brasília: Embrapa, 18 p., 2018.

VALLS, José; POZZOBON, Marisa. **Variação apresentada pelos principais grupos taxonômicos de *Paspalum* com interesse forrageiro no Brasil.** In: Encontro Internacional sobre Melhoramento Genético de *Paspalum*, 1987, Nova Odessa, Instituto de Zootecnia. Anais eletrônicos... Nova Odessa: p. 15-21, 1987.

VERMEIRE, Lance; RUSSELL, Morgan. Seasonal timing of fire alters biomass and species composition of northern mixed prairie. **Rangeland Ecology & Management**, v. 71, n. 6, p. 714–720, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2018.06.005>.

WALLAU, Marcelo; AZAMBUJA, Júlio; SILVA NETO, Gentil. Caracterização da Região e da Área Experimental. In: CARVALHO, Paulo; WALLAU, Marcelo; BREMM, Carolina; BONNET, Olivier; TRINDADE, Júlio; ROSA, Fabiane; FREITAS, Thainá; MOOJEN, Fernanda; NABINGER, Carlos (ed.). **NATIVÃO: + de 30 Anos de Pesquisa em Campo Nativo.** Porto Alegre: UFRGS, p. 7-14, 2019.

Autores

Juliana Medianeira Machado¹, Camila Soares Martins¹, Dinah Pereira Abbott Rodrigues¹, Fernando Forster Furquim¹, Arthur Fernandes Bettencourt¹, Eduarda Gabriely de Souza¹, Fábio Pedrazzi de Vargas¹, Gabriele Da Roza dos Santos¹, Gustavo Pires Luft¹, João Vitor de Campos Aguiar¹, Maiani Vieira Domingues¹, Anna Vargas Magalhães¹, Maria Eduarda Cassol Vincensi¹, Daniel Pivotto Cerezer¹, Paula Montagner²

¹Departamento de Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, ²Departamento de Microbiologia e Parasitologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

CAPÍTULO 9

Princípios e potencial da tecnologia NIRS fecal para estimativas nutricionais de ruminantes em pastejo

Eliana Bordin Dutra, Lucas Biscaglia Miranda, Eduarda Jahnke Kepplin, Rafaela Rorato de Oliveira, Eduardo Bohrer de Azevedo

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-39-8.c9>

Resumo

Metodologias convencionais para obter estimativas nutricionais de ruminantes em pastejo são frequentemente onerosas, invasivas e de difícil aplicação a nível de fazenda. Diante disso, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) aplicada às fezes (fNIRS) surge como uma tecnologia de análise rápida e não invasiva. Essa técnica baseia-se na correlação entre a composição química das fezes e os parâmetros nutricionais da dieta ingerida. Há décadas, a técnica fNIRS é estudada com o intuito de se tornar uma ferramenta prática para técnicos da área. Para a calibração de modelos fNIRS robustos, é recomendável que sejam específicos para cada região, refletindo as condições produtivas e a heterogeneidade da forragem que se deseja representar. Portanto, metodologias para coleta de fezes, desenvolvimento de regressões, pré-processamento espectral e validação devem ser rigorosamente estabelecidos. Uma das limitações para a construção desses modelos é a necessidade de um banco de dados extenso, cujas amostras dependem de experimentos convencionais. Nesse contexto, o desenvolvimento de modelos multiespécie animal, representa uma estratégia promissora para superar a limitação do tamanho amostral e a aplicabilidade da técnica. Portanto, embora a fNIRS demonstra um potencial transformador para a nutrição de precisão em sistemas pastoris, a sua consolidação depende da contínua investigação para expandir e refinar os bancos de dados de calibração, tornando-a uma ferramenta acessível e rotineira no manejo nutricional do rebanho.

Palavras-chave: fezes, forragem, indicador nutricional, infravermelho próximo.

1. Introdução

A produção de ruminantes em sistemas pastoris representa parte expressiva da produção global de carne e leite, caracterizando-se pelo uso eficiente dos recursos naturais e pela sustentabilidade ambiental. No entanto, a

elevada variabilidade das forragens — influenciada por fatores como estágio fenológico, manejo e condições edafoclimáticas — dificulta a obtenção de estimativas precisas de consumo e digestibilidade (Van Soest, 1994; Boval e Dixon, 2012; Azevedo et al., 2024).

Diversas metodologias têm sido utilizadas para avaliação nutricional de ruminantes em pastejo, como o uso de indicadores, ensaios de digestibilidade e simulação de pastejo. Apesar de sua precisão, esses métodos são caros, trabalhosos e de difícil aplicação em uma ampla escala (Carvalho et al., 2007; Dixon e Coates, 2010; Penning, 2004).

Tendo isso em vista, a espectroscopia no infravermelho próximo fecal (fNIRS) surge como uma ferramenta promissora, baseada na correlação entre o espectro característico das amostras de fezes e a composição química da dieta. A técnica permite estimar parâmetros como digestibilidade, proteína bruta da dieta e nitrogênio fecal, de forma rápida, não invasiva e sustentável (Coates e Dixon, 2011; Landau et al., 2016; Tolleson e Angerer, 2021).

Assim, este capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão das metodologias convencionais para avaliação nutricional de ruminantes em pastejo. Além de fazer uma discussão sobre os fundamentos, vantagens e limitações da tecnologia fNIRS e abordar o desenvolvimento e potencial de modelos de calibração multiespécies, que ampliam a aplicabilidade dessa ferramenta em sistemas produtivos diversos.

2. Parâmetros nutricionais de ruminantes em pastejo

O manejo alimentar de ruminantes é baseado principalmente em forragem, sejam cultivadas ou nativas, caracterizando-se por elevada variabilidade em sua composição química e valor nutricional (Van Soest, 1994). Aspectos bióticos como o estágio fenológico da cultura e fatores abióticos como fertilidade do solo, manejo da forragem e condições edafoclimáticas influenciam diretamente a variabilidade nutricional dos alimentos. Tais fatores intensificam a variabilidade dos sistemas forrageiros, dificultando a obtenção de estimativas precisas de parâmetros nutricionais da dieta de ruminantes, especialmente consumo e digestibilidade (Azevedo et al., 2024; Boval e Dixon, 2012).

Desta forma, o uso das fezes como indicador nutricional ganha relevância nas pesquisas pela praticidade e facilidade de coleta de amostras. Esta abordagem auxilia especialmente quando consideramos que o consumo voluntário e a digestibilidade formam base fundamentais na nutrição animal. Os dois fatores podem ser compreendidos como a relação com a capacidade de atender às demandas nutricionais de manutenção e produção (consumo voluntário) e a eficiência do aproveitamento dos nutrientes ingeridos (digestibilidade) (Carvalho et al., 2007). Tradicionalmente, a estimativa dos parâmetros nutricionais é realizada através do uso de indicadores internos e externos, métodos consolidados na literatura (Moura et al., 2013). Porém, tais técnicas apresentam entraves relacionados a custos elevados, necessidade de manipulação de animais, logística de coleta, demanda de mão de obra especializada e análises laboratoriais onerosas (Dixon e Coates, 2010).

Da mesma forma, a avaliação da concentração de proteína bruta na dieta (cPBd), parâmetro essencial aos processos fisiológicos de crescimento, manutenção e produção, também enfrenta desafios metodológicos (Carvalho et al., 2021). O método convencional, conhecido como simulação de pastejo, baseia-se na observação do comportamento ingestivo dos animais e na coleta de amostras representativas do material consumido (Halls, 1954; Cook, 1964). Por depender de julgamento subjetivo, a acurácia do método está condicionada ao treinamento adequado dos avaliadores, o que é determinante para garantir a representatividade e a qualidade das amostras (Bonnet et al., 2011).

A análise do nitrogênio (N) fecal tem se destacado como alternativa eficiente para a avaliação nutricional de ruminantes em pastejo, por apresentar correlação com o consumo e a digestibilidade (Lancaster, 1949; Peripolli et al., 2011). Além de permitir coletas pontuais e não invasivas, o método possibilita estimar a digestibilidade por meio de modelos regionais já consolidados (Wang et al., 2009; Azevedo et al., 2014). Contudo, a estimativa precisa do consumo ainda requer a determinação da excreção fecal (Savian et al., 2018). Em contraste, os ensaios de digestibilidade in vivo fornecem medições diretas dos parâmetros nutricionais, mas demandam infraestrutura específica e apresentam custos elevados, além de alterarem o comportamento natural de pastejo dos animais (Penning, 2004).

3. NIRS fecal na estimativa de parâmetros nutricionais de ruminantes em pastejo

3.1. Princípio da tecnologia NIRS, obtenção dos espectros e pré-processamentos

Considerando as limitações para obter estimativas de parâmetros nutricionais de ruminantes em pastejo, especialmente devido à heterogeneidade das forragens, a tecnologia de espectroscopia no infravermelho próximo fecal (fNIRS) surge como uma ferramenta promissora para a área (Coates e Dixon, 2011; Peters et al., 2023). O potencial de uso das fezes aliado a tecnologia NIRS diz respeito a facilidade para obter as amostras, assim como pelo fato de que aproximadamente 70% da variação entre animais no consumo e digestibilidade pode ser explicada através deste produto do processo digestivo (Holloway et al., 1981). Como vantagem do uso da fNIRS, destacam-se a rápida leitura das amostras, possibilitando a realização de ajustes nutricionais em um menor tempo, trata-se de uma metodologia não invasiva, pois a partir de coletas pontuais de fezes é possível realizar a leitura das amostras para estimativas nutricionais, além de dispensar o uso de reagentes químicos (Lyons e Stuth, 1992; Rossa et al., 2025; Tolleson e Angerer, 2021). Porém, para que seja possível utilizar essa ferramenta a nível de campo, com segurança e precisão, é necessário realizar a calibração do equipamento, a partir de amostras obtidas em experimentos com animais recebendo forragem, construindo modelos robustos e representativos da heterogeneidade do sistema produtivo que se quer representar (Landau et al., 2016).

A tecnologia NIRS trata-se de uma técnica analítica que utiliza radiação eletromagnética na faixa de 780 a 2500 nm. Quando uma amostra é submetida a leitura em NIRS a luz interage com as ligações químicas das moléculas, especialmente com C-H, O-H e N-H, gerando um espectro característico que atua como um indicador único da sua composição molecular. O princípio físico utilizado pelo equipamento NIRS para amostras sólidas e heterogêneas, como no caso das fezes, é a reflectância difusa. O equipamento emite luz com intensidade conhecida (I_0) e mede a intensidade refletida (I) pela amostra. A reflectância ($R = I/I_0$) é então convertida em absorbância (A) através da relação

$A = \log_{10}(1/R)$, fornecendo informações sobre a interação da luz com a amostra em comprimentos de onda específicos (Williams e Norris, 2001).

A partir da condução de experimentos e obtenção das amostras de fezes, inicia-se a construção dos modelos de regressão multivariada para análise via NIRS, onde o primeiro passo consiste na aquisição dos espectros NIRS, seguida pela aplicação de metodologias quimiométricas. A regressão por Partial Least Squares (PLS) é a metodologia convencionalmente empregada, que correlaciona os dados espectrais com os valores de referência obtidos por métodos analíticos convencionais (Martens e Naes, 1992). Uma etapa crítica no processo de calibração trata-se do pré-processamento espectral, que tem como objetivo minimizar interferências, como ruídos instrumentais, heterogeneidade das partículas, ou variações resultantes da umidade. Metodologias como Standard Normal Variate (SNV), Extended Multiplicative Scatter Correction (EMSC), Detrending (DET), Savitsky-Golay (SG) e derivadas são comumente empregadas, isoladamente ou em diferentes combinações (Engel et al., 2013). A seleção dos pré-processamentos e combinações mais adequados para cada variável de interesse é guiada por parâmetros estatísticos como: coeficiente de determinação (R^2), root mean square error (RMSE) e relative predict error (RPE) (Williams, 2004; Fuentes-Pila et al., 1996).

3.2. Metodologias de validação dos modelos fNIRS

Posterior a essa etapa de calibração do equipamento NIRS, deve ser realizada a validação dos modelos desenvolvidos. O objetivo da fase de validação é avaliar a capacidade preditiva dos modelos em estimar os parâmetros nutricionais de interesse, e para isso, pode ser aplicada validação interna ou externa, dependendo do tamanho do conjunto de dados disponível (Dias, Nunes e Borba, 2024). A validação interna ou cross-validation (CV) tem como objetivo usar grupos de amostras ou amostras individuais na validação. A CV do tipo leave-one-out, consiste na remoção de uma amostra por vez do modelo, o modelo é ajustado e validado a partir dessa amostra excluída, e o procedimento se repete até que todas as amostras tenham sido utilizadas para validação (Lopez et al., 2023).

Enquanto isso, na CV leave-one-group as amostras são organizadas em grupos distintos com base em características compartilhadas, como, por exemplo, locais de amostragem. Nessa metodologia, grupos inteiros são deixados de fora e usados como conjunto de validação a cada ajuste do modelo, preservando as características inerentes dos grupos e permitindo avaliar a variabilidade interamostras. Em contrapartida, a CV k-fold é uma metodologia onde o conjunto de dados é dividido aleatoriamente em k subconjuntos de tamanhos iguais, sendo o modelo treinado e validado k vezes, ou seja, o processo é repetido até que todos os subconjuntos tenham sido utilizados na validação. Essa abordagem é utilizada devido a sua flexibilidade e simplicidade, especialmente quando os dados não são agrupados naturalmente (Ezenarro e Schorn-García, 2025; Lopez et al., 2023).

Também é possível realizar validação externa, a partir de um conjunto de dados independentes ou através da separação de subconjuntos amostrais, onde essa metodologia é usualmente aplicada quando há maior disponibilidade de dados. A validação externa a partir de um conjunto de dados independentes, ou seja, por meio de dados totalmente separados do processo de calibração, garante que a avaliação de desempenho do modelo reflita sua capacidade de prever novas amostras, sendo esse o “padrão ouro” de validação (Leite e Stuth, 1995; Ezenarro e Schorn-García, 2025).

Entretanto, quando há limitações na disponibilidade de dados, é possível dividir o banco amostral em subconjuntos de calibração e validação, garantindo que o conjunto de validação seja representativo. O tamanho do subconjunto de validação é definido pela equipe, geralmente os trabalhos utilizam de 20 a 30% dos dados para essa etapa (Martens e Naes, 1992; Johnson et al., 2017; Ezenarro e Schorn-García, 2025). Essas estratégias permitem verificar a robustez e a aplicabilidade dos modelos, assegurando sua confiabilidade preditiva. Cabe destacar que uma validação insuficiente pode ter implicações práticas, incluindo decisões equivocadas e perdas econômicas.

3.3 Desenvolvimento da tecnologia fNIRS para estimativas nutricionais de ruminantes

A técnica NIRS é bem estabelecida e utilizada em diversos setores, tais como agricultura (Carvalho et al., 2022), alimentos (Ferreira et al., 2023; Trópia et al., 2024), controle de qualidade de insumo (Santos et al., 2025) e até mesmo em indústrias do ramo petrolífero (Yu et al., 2022). Na área de nutrição de ruminantes, os primeiros trabalhos foram desenvolvidos por Brooks, Anderson e Urness (1984) e tiveram maior aprofundamento a partir dos trabalhos do Dr. Jerry Stuth (Texas A&M University, EUA) e Dr. David Coates (CSIRO, Austrália), com foco em parâmetros nutricionais como digestibilidade e proteína da dieta. Desde então a tecnologia vem sendo estudada e desenvolvida, com ênfase na construção de modelos para estimativa de consumo voluntário (Parra-Forero et al., 2023; Graças, 2021), digestibilidade (Boval et al., 2004; Peters et al., 2023), proteína da dieta (Johnson et al., 2017; Tolleson e Schafer, 2014), nitrogênio fecal (Xu et al., 2023; Decruyenaere et al., 2012) e frações fibrosas (Landau et al., 2016; Rossa et al., 2025).

O uso do fNIRS para estimativa de parâmetros da dieta apresenta grande potencial, pois permite a realização de análises em larga escala, com rápida resposta, menor intervenção animal e redução de custos (Stuth, Jama, Tolleson, 2003). No entanto, é fundamental destacar as lacunas e fatores que limitam o desenvolvimento da tecnologia. A composição das fezes dos ruminantes varia significativamente devido à diversidade e complexidade de fatores que influenciam o consumo voluntário, somada a alta heterogeneidade de sistemas alimentares e espécies forrageiras existentes (Decruyenaere et al., 2015). Dessa forma, a construção de modelos robustos exige bancos amostrais regionais representativos, devendo a calibração refletir a heterogeneidade específica de cada sistema produtivo, visando agregar precisão e robustez (Tolleson et al., 2025).

Ademais, outro fator crucial no desenvolvimento da tecnologia fNIRS se trata da metodologia de obtenção das amostras. Na literatura é possível encontrar calibrações construídas a partir de amostras obtidas por meio de coletas pontuais de fezes, coletas pontuais combinadas com coletas via fístula esofágica, coleta de fezes com auxílio de bolsas coletoras, com uso de

indicadores fecais e também via ensaios de digestibilidade in vivo. Cabe mencionar que todas as metodologias apresentam pontos positivos e negativos, porém deve-se considerar a importância da etapa de aquisição das amostras, tendo em vista que irão compor a calibração. Erros associados a fase experimental, ou até mesmo laboratorial, podem colaborar com erros inseridos nos modelos, dessa forma, a tomada de decisão sobre a metodologia de coleta constitui uma etapa fundamental no desenvolvimento da ferramenta.

Levando em consideração o desenvolvimento da tecnologia fNIRS na estimativa de parâmetros nutricionais de ruminantes, selecionamos 29 trabalhos desenvolvidos de 1992 a 2025, apresentados no Quadro 1. O tamanho do banco de dados utilizado na construção dos modelos variou de 44 amostras até 2068. Do total de trabalhos selecionados, 25 desenvolveram calibrações para uma única espécie animal, sendo 16 de bovinos, oito de ovinos e um de caprinos, e apenas quatro construíram modelos multiespécie. Quanto à metodologia para obtenção das amostras de fezes, 18 trabalhos obtiveram as amostras de forma pontual, coletando diretamente da ampola retal ou do solo e 11 trabalhos realizaram coleta total de fezes. E para validação dos modelos desenvolvidos, seguindo os conceitos de cross-validation e validação externa, foram realizadas cross-validation em 24 trabalhos e validação externa em 18 trabalhos.

4. Modelos fNIRS multiespécies para estimativas nutricionais em ruminantes

Levando em consideração o potencial da tecnologia fNIRS para estimar os parâmetros nutricionais da dieta por meio dos componentes fecais, uma das principais limitações se refere ao tamanho do banco de dados, o que impacta diretamente a robustez dos modelos preditivos (Dias, Nunes, Borba, 2024). Devido a heterogeneidade dos sistemas forrageiros, aliada às dificuldades para o desenvolvimento de estudos com ruminantes, especialmente para a condução de ensaios de digestibilidade, a construção de modelos multiespécies surge como uma alternativa para contornar bancos amostrais limitados, ampliando assim a representatividade dos modelos preditivos (Dixon e Coates, 2009; Rossa et al., 2025).

Estudos prévios destacam o potencial de equações multiespécies via N fecal para estimar a digestibilidade, abrangendo diferentes espécies e dietas, com resultados satisfatórios. Lukas et al. (2005) desenvolveram um modelo baseado na correlação com N fecal, utilizando amostras provenientes de vacas leiteiras e novilhos alimentados com dietas variadas. Esse modelo foi validado por Schlecht e Susenbeth (2006) utilizando amostras de bovinos, ovinos e caprinos, demonstrando que a espécie animal não afetou a precisão das estimativas, embora o tipo de alimento tenha influenciado. De modo similar, Kozloski et al. (2018) elaboraram uma equação a partir de amostras de ovinos e bovinos para estimar consumo, sem influência de espécie animal. Barreto et al. (2024) também obtiveram desempenho satisfatório em modelos multiespécies para estimar consumo e digestibilidade.

Entretanto, ainda há escassez de pesquisas desenvolvendo modelos multiespécies utilizando fNIRS para estimativas nutricionais. Villamuelas et al. (2017) geraram calibrações para N fecal com amostras de diversas espécies herbívoras, enquanto Tolleson e Angerer (2021) desenvolveram modelos para N e fósforo fecais. Rossa et al. (2025), por sua vez, estabeleceram calibrações para frações da fibra fecal de herbívoros. Todos estes trabalhos citados anteriormente obtiveram resultados satisfatórios para os seus modelos multiespécie. Ademais, trabalhos construindo calibrações NIRS utilizando diferentes fontes de alimentos para ruminantes são comuns de serem encontrados na literatura, porém sem avançar para a elaboração de modelos multiespécie (Foskolos et al., 2015; Decruyenaere et al., 2009; Parra-Forero et al., 2023; Andueza et al., 2017).

Assim, diante da heterogeneidade dos sistemas forrageiros e da variabilidade natural entre as espécies animais, a construção de modelos multiespécies pode fortalecer a robustez dos modelos, preenchendo lacunas presentes nos bancos de dados e melhorando assim a representatividade das condições estudadas. Outra vantagem se encontra na fase experimental, já que o uso de pequenos ruminantes reduz os custos de pesquisa, devido a necessidade de menores quantidades de alimento, infraestrutura mais simples e menor mão de obra, além de permitir maior tamanho amostral quando comparado a experimentos realizados com bovinos.

Quadro 1. Trabalhos de pesquisa sobre fNIRS na estimativa de parâmetros nutricionais de ruminantes

(Continua)

Tipo de trabalho	Autores	Ano	País	N amostral	Espécie animal	Metodologia de coleta	Forragem	Variáveis	Validação
Artigo de pesquisa	Lyons; Stuth	1992	Estados Unidos	54	Bovinos	Coleta pontual de fezes. Uso de animais fistulados	Diversas espécies forrageiras	DMO ¹ e PB ²	Validação externa
Artigo de pesquisa	Leite; Stuth	1995	Estados Unidos	163; 86	Caprinos	Coleta pontual de fezes. Coleta via fístula esofágica. Digestibilidade e <i>in vitro</i>	Campo nativo do Texas, <i>Claypan Savannah</i>	DMO e PB	Validação externa com dados independentes
Artigo de pesquisa	Boval <i>et al.</i>	2004	França	88	Bovinos	Coleta total de fezes. Ensaio de digestibilidade e <i>in vivo</i>	<i>Dichanthium</i> spp. e <i>Digitaria decumbens</i>	Parâmetros da dieta: PB, FDN ³ , FDA ⁴ , DMO e CMO ⁵	<i>Cross-validation k-fold</i>
Artigo de pesquisa	Coates; Dixon	2007	Austrália	1501	Bovinos	Coleta pontual de fezes, via ampola retal e diretamente do solo	Diversas espécies forrageiras	Proporção de não gramíneas	<i>Cross-validation</i>
Artigo de pesquisa	Fanchone <i>et al.</i>	2007	França	84	Ovinos	Coleta total de fezes. Ensaio de digestibilidade e <i>in vivo</i>	<i>Digitaria decumbens</i>	Composição da dieta: PB, FDN, FDA, LDA ⁶ . Parâmetros da dieta: CMO, DMO	<i>Cross-validation k-fold</i>
Artigo de pesquisa	Coates; Dixon	2008	Austrália	1637	Bovinos	Coletas pontual de fezes, via ampola retal e diretamente do solo. Simulação de pastejo	Diversas espécies forrageiras	Proporção de não gramíneas	<i>Cross-validation</i> e validação a partir da expansão sequencial dos dados da calibração
Artigo de pesquisa	Fanchone; Archimède; Boval	2009	França	174	Ovinos	Coleta total de fezes. Ensaio de digestibilidade e <i>in vivo</i>	<i>Digitaria decumbens</i>	DMO	<i>Cross-validation k-fold</i> . Validação externa com dados independentes

Artigo de pesquisa	Decruynaere <i>et al.</i>	2009	França e Bélgica	2068	Ovinos	Ensaio de digestibilidade e <i>in vivo</i>	Diversas espécies forrageiras	DMO e CMO	Cross-validation
Artigo de pesquisa	Coates; Dixon	2011	Austrália	1052	Bovinos	Coleta pontual de fezes. Coleta total de fezes. Digestibilidade e <i>in vitro</i>	Diversas espécies forrageiras	DMS ⁷	Validação

(Continua)

Tipo de trabalho	Autores	Ano	País	N amostral	Espécie animal	Metodologia de coleta	Forragem	Variáveis	Validação
Artigo de pesquisa	Decruynaere <i>et al.</i>	2012	Bélgica	44	Bovinos	Coleta pontual de fezes via ampola retal. Ensaio em pastejo, utilizando marcador externo	Pastejo com suplementação	Parâmetros da dieta: MM ⁸ , PB, celulose, DMO; Composição das fezes: MM, PB, FDA	Cross-validation
Artigo de pesquisa	Tolleson ; Schafer	2014	Estados Unidos		Bovinos	Coleta pontual de fezes diretamente do solo	Diversas espécies forrageiras	ECC ⁹	Cross-validation
Artigo de pesquisa	Decruynaere <i>et al.</i>	2015	Bélgica		Ovinos e bovinos	Ensaio de digestibilidade e	Diversas espécies forrageiras	Parâmetros da dieta: DMO, CMS, CMO	Cross-validation e validação externa com dados independentes
Artigo de pesquisa	Landau <i>et al.</i>	2016	Israel	125	Bovinos	Coleta pontual de fezes via ampola retal	Diversas espécies forrageiras com inclusão de suplementação	Composição das fezes, da dieta e consumo de nutrientes	Cross-validation k-fold e validação externa
Artigo de pesquisa	Núñez-Sánchez <i>et al.</i>	2016	Espanha	96	Ovinos	Coleta pontual de fezes via ampola retal. Ensaio de digestibilidade e <i>in vivo</i>	Dietas heterogêneas	Composição da dieta: MM, PB, FDN, EE ¹⁰ e alimentos da dieta	Cross-validation leave-one-group
Artigo de pesquisa	Landau <i>et al.</i>	2017	Israel		Bovinos	Coleta pontual de fezes diretamente do solo. Coleta de amostras da forragem	Vegetação <i>hemicryptophytic grassland</i> com inclusão de suplementação	Fezes: MM, PB, FDN; Forragem: MM, PB, FDN, DIVMS ¹¹ e energia	Cross-validation. Validação externa com dados independentes

								metabolizável. Proporção de concentração na dieta	
Artigo de pesquisa	Andueza <i>et al.</i>	2017	França	1040	Ovinos	Coleta total de fezes	Diversas espécies forrageiras	Composição das fezes: MM e PB; Parâmetros da dieta: CMS e DMO	<i>Cross-validation k-fold.</i> Validação externa a partir da separação de um subconjunto de dados

(Continua)

Tipo de trabalho	Autores	Ano	País	N amostral	Espécie animal	Metodologia de coleta	Forragem	Variáveis	Validação
Artigo de pesquisa	Villamuelas <i>et al.</i>	2017	Espanha, França, Portugal, Itália e Suíça	345	Diversos herbívoros, domésticos e selvagens	Coleta pontual de fezes via ampola retal e diretamente do solo	Espanha, Portugal, Itália e França	Composição das fezes: N ¹²	<i>Cross-validation leave-one-out.</i> Validação externa a partir de um subconjunto (20%) e independente
Artigo de pesquisa	Johnson <i>et al.</i>	2017	Estados Unidos	408	Bovinos	Coleta total de fezes	Dietas heterogêneas	Composição da dieta: PB, FDN, DMS, CMS ¹³	<i>Cross-validation leave-one-group.</i> Validação externa a partir de um subconjunto (20%)
Artigo de pesquisa	Gindri <i>et al.</i>	2019	Brasil	63	Ovinos	Coleta total de fezes. Fístula ruminal. Simulação de pastejo. Digestibilidade e <i>in situ</i> . Consumo via N fecal	Campo nativo do Bioma Pampa	PB e DMO	<i>Cross-validation k-fold.</i> Validação externa com dados independentes
Dissertação	Daniel Martins de Oliveira	2019	Brasil	270	Bovinos	Coleta total de fezes. Ensaio de digestibilidade e <i>in vivo</i>	<i>Pennisetum purpureum</i>	Parâmetros da dieta: PB, FDN, MO ¹⁴ ; Digestibili	<i>Cross-validation leave-one-out.</i> Validação externa a

								dade: PB, FDN, MO	partir de um subconjunto de dados
Dissertação	Igor Cassiano Saraiva Silva	2020	Brasil	120	Ovinos	Coleta pontual de fezes. Simulação de pastejo. Digestibilidade e <i>in vitro</i>	<i>Panicum maximum</i> , cv. Mombaça, suplementação	Parâmetros da dieta: PB e DIVMS	Cross-validation. Validação externa a partir de um subconjunto (25%)
Dissertação	Larissa Estefane Cruz das Graças	2021	Brasil	234	Bovinos	Coleta total de fezes	Ração total misturada	Parâmetros da dieta: CMS, MS ¹⁵ , PB, FDN, amido; digestibilidade	Cross-validation k-fold
Artigo de pesquisa	Tolleson ; Angerer	2021	Estados Unidos	512	Diversos herbívoros, domésticos e selvagens	Coleta pontual diretamente do solo	Território dos EUA e Havaí	Composição das fezes: N e P ¹⁶	Cross-validation k-fold e leave-one-group. Validação externa com dados independentes (Conclusão)

Tipo de trabalho	Autores	Ano	País	N amostral	Espécie animal	Metodologia de coleta	Forragem	Variáveis	Validação
Artigo de pesquisa	Parra-Forero <i>et al.</i>	2023	Colômbia	57	Bovinos	Utilização de marcadores fecais internos e externos. Simulação de pastejo	Forragens heterogêneas; uso de suplementação	DMS, CMS e produção fecal	Cross-validation leave-one-out. Validação externa a partir de um subconjunto (20%)
Artigo de pesquisa	Peters <i>et al.</i>	2023	Canadá	186	Bovinos	Coleta total de fezes e coleta pontual em situação de pastejo. Ensaio de digestibilidade e <i>in vivo</i>	Dietas heterogêneas e em pastejo de forrageiras heterogêneas	Composição fecal: MO, N, FDN, FDA, Ca ¹⁷ , P; Parâmetros da dieta: CMS, CMO, DMS e DMO	Validação externa a partir de um subconjunto (20%)

Artigo de pesquisa	Molle <i>et al.</i>	2023	Itália		Ovinos	Coleta total de fezes e pontual via ampola retal. Ensaio de digestibilidade <i>in vivo</i> e ensaios em pastejo. Simulação de pastejo	Dietas heterogêneas e em pastejo de forrageiras heterogêneas, com suplementação	Diversos parâmetros da dieta, digestibilidade de nutrientes e composição	<i>Cross-validation k fold</i> . Validação externa a partir de um subconjunto (25%)
Artigo de pesquisa	Xu <i>et al.</i>	2023	China	542	Bovinos	Coleta pontual de fezes via ampola retal, em diferentes fazendas	Ração total misturada e leite integral	Composição das fezes: MS, PB, EE, FDN, FDA, MM, amido	<i>Cross-validation k-fold</i> . Validação externa a partir de um subconjunto (25%)
Artigo de pesquisa	Rossa <i>et al.</i>	2025	Portugal, Espanha, Alemanha, França, Itália e Suíça	508	Diversos herbívoros, domésticos e selvagens	Coleta pontual de fezes via ampola retal e diretamente do solo	Portugal, Itália, França, Suíça, Espanha	FDN, FDA, LDA	Validação externa a partir de um subconjunto (20%) e com dados independentes
Artigo de pesquisa	Tolleson <i>et al.</i>	2025	Estados Unidos		Bovinos	Coleta pontual de fezes	Pastagem nativa do Texas	Parâmetros da dieta: PB, ECC	<i>Cross-validation</i>

¹ Digestibilidade da matéria orgânica; ² Proteína bruta da dieta; ³ Fibra em detergente neutro; ⁴ Fibra em detergente ácido; ⁵ Consumo de matéria orgânica; ⁶ Lignina em detergente ácido; ⁷ Digestibilidade da matéria seca; ⁸ Matéria mineral; ⁹ Escore de condição corporal; ¹⁰ Extrato Etéreo; ¹¹ Digestibilidade *in vitro* da matéria seca; ¹² Nitrogênio; ¹³ Consumo de matéria seca; ¹⁴ Matéria orgânica; ¹⁵ Matéria seca; ¹⁶ Fósforo; ¹⁷ Cálcio.

5. Considerações finais

A avaliação nutricional de ruminantes em pastejo representa um desafio contínuo para pesquisadores e técnicos, devido à elevada variabilidade dos sistemas forrageiros e às limitações metodológicas associadas às técnicas convencionais. Métodos como a coleta total de fezes, o uso de indicadores e os ensaios de digestibilidade, embora precisos, são de difícil aplicação em larga escala por exigirem elevada complexidade operacional, alto custo e tempo considerável de execução (Dixon e Coates, 2010; Penning, 2004). Nesse contexto, a espectroscopia no infravermelho próximo fecal (fNIRS) surge como uma alternativa inovadora e promissora, permitindo estimativas rápidas, não invasivas e economicamente viáveis de parâmetros nutricionais fundamentais,

como a digestibilidade, o consumo voluntário e a composição da dieta (Peters *et al.*, 2023; Molle *et al.*, 2023).

Os avanços recentes na calibração e validação de modelos fNIRS têm demonstrado a capacidade da técnica em gerar resultados consistentes, desde que as calibrações sejam representativas e devidamente ajustadas às condições regionais e às características das amostras (Landau *et al.*, 2016; Dias, Nunes, Borba, 2024). Além disso, o desenvolvimento de modelos multiespécies amplia as possibilidades de aplicação da ferramenta, tornando-a mais robusta e abrangente frente à heterogeneidade dos sistemas produtivos e das dietas dos ruminantes (Villamuelas *et al.*, 2017; Rossa *et al.*, 2025).

Dessa forma, a fNIRS consolida-se como uma ferramenta estratégica para o futuro da pesquisa e do manejo nutricional em sistemas pastoris. Sua adoção pode contribuir significativamente para o aprimoramento da eficiência alimentar, a redução de custos experimentais e a sustentabilidade da produção animal (Stuth, Jama, Tolleson, 2003; Peters *et al.*, 2023). O avanço contínuo das pesquisas nessa área, com ênfase na ampliação de bancos de dados e na integração de técnicas quimiométricas mais sofisticadas, será determinante para consolidar a fNIRS como um método de referência na avaliação nutricional de ruminantes em pastejo.

6. Referências bibliográficas

- ANDUEZA, Donato *et al.* Fecal near-infrared reflectance spectroscopy prediction of the feed value of temperate forages for ruminants and some parameters of the chemical composition of feces: efficiency of four calibration strategies. **Applied Spectroscopy**, v. 71, n. 9, jun. 2017. <https://doi.org/10.1177/0003702817712740>.
- AZEVEDO, Eduardo Bohrer *et al.* Nutritional characteristics estimated by faecal protein in cattle fed with heterogeneous natural grassland. **Animal Production Science**, v. 64, AN22418, jan. 2024. <https://doi.org/10.1071/AN22418>.
- AZEVEDO, Eduardo Bohrer *et al.* Use of faecal components as markers to estimate intake and digestibility of grazing sheep. **Livestock Science**, v. 165, p. 42–50, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.04.018>.

- BARRETO, Mariana *et al.* Can a cattle and sheep mixed model based on fecal crude protein estimate the feed intake and digestibility. [Preprint]. 2024. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4766552>.
- BONNET, Olivier *et al.* Is hand plucking an accurate method of estimating bite mass and instantaneous intake of grazing herbivores? **Rangeland Ecology & Management**, v. 64, p. 366–374, jul. 2011. <https://doi.org/10.2111/REM-D-10-00186.1>.
- BOVAL, Maryline; DIXON, Robert. The importance of grasslands for animal production and other functions: a review on management and methodological progress in the tropics. **Animal**, v. 6, n. 5, p. 748–762, fev. 2012. <https://doi.org/10.1017/S1751731112000304>.
- BOVAL, Maryline *et al.* Faecal near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to assess chemical composition, in vivo digestibility and intake of tropical grass by Creole cattle. **Animal Feed Science and Technology**, v. 114, n. 1–4, p. 19–29, maio 2004. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2003.12.009>.
- BROOKS, J.; ANDERSON, M.; URNESS, P. J. Infrared reflectance analysis of forage quality for elk. **Journal of Wildlife Management**, v. 48, p. 254–258, 1984.
- CARVALHO, Chrislanne *et al.* Methods of analysis of the chemical composition and nutritional value of ruminant feeds. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, e523101019047, ago. 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.19047>.
- CARVALHO, Jacques *et al.* Combining different pre-processing and multiplicative methods for prediction of soil organic matter by near infrared spectroscopy (NIRS) in Southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 29, jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00530>.
- CARVALHO, Paulo *et al.* Advances in methods for determining animal intake on pasture. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 36, p. 151–170, jul. 2007. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982007001000016>.
- COATES, David Blair; DIXON, Robert. Developing robust faecal near infrared spectroscopy calibrations to predict diet dry matter digestibility in cattle consuming tropical forages. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 19, n. 6, p. 507–519, 2011. <https://doi.org/10.1255/jnirs.967>.
- COATES, David Blair; DIXON, Robert. Development of near infrared analysis of faeces to estimate non-grass proportions in diets selected by cattle grazing tropical pastures. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 16, p. 471–480, 2008. <https://doi.org/10.1255/jnirs.815>.
- COATES, David Blair; Dixon, Robert. Faecal near infrared reflectance spectroscopy (F.NIRS) measurements of non-grass proportions in the diet of cattle grazing tropical rangelands. **The Rangeland Journal**, v. 29, n. 1, p. 51–63, 2007. <https://doi.org/10.1071/RJ07011>.

- COOK, Wayne. Symposium on nutrition of forages and pastures: collecting forage samples representative of ingested material of grazing animals for nutritional studies. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 23, n. 1, p. 265–270, fev. 1964. <https://doi.org/10.2527/jas1964.231265x>.
- DECRUYENAERE, Virginie *et al.* Evaluation of green forage intake and digestibility in ruminants using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS): developing a global calibration. **Animal Feed Science and Technology**, v. 148, n. 2–4, p. 138–156, jan. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2008.03.007>.
- DECRUYENAERE, Virginie *et al.* Faecal near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) compared with other techniques for estimating the in vivo digestibility and dry matter intake of lactating grazing dairy cows. **Animal Feed Science and Technology**, v. 173, n. 3–4, p. 220–234, maio 2012. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.02.005>.
- DECRUYENAERE, Virginie *et al.* Prediction error and repeatability of near infrared reflectance spectroscopy applied to faeces samples in order to predict voluntary intake and digestibility of forages by ruminants. **Animal Feed Science and Technology**, v. 205, p. 49–59, jul. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.04.011>.
- DIAS, Cristiana Maduro; NUNES, Helder; BORBA, Alfredo. Near-infrared spectroscopy in animal nutrition: historical insights, technical principles, and practical applications. **Analytica**, v. 5, n. 4, p. 481–498, out. 2024. <https://doi.org/10.3390/analytica5040033>.
- DIXON, Robert; COATES, David Blair. Near infrared spectroscopy of faeces to evaluate the nutrition and physiology of herbivores. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 17, n. 1, jan. 2009. <https://doi.org/10.1255/jnirs.822>.
- DIXON, Robert; COATES, David Blair. Diet quality estimated with faecal near infrared reflectance spectroscopy and responses to N supplementation by cattle grazing buffel grass pastures. **Animal Feed Science and Technology**, v. 158, n. 3–4, p. 115–125, jun. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2010.04.002>.
- ENGEL, Jasper *et al.* Breaking with trends in pre-processing? **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 50, p. 96–106, out. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.04.015>.
- EZENARRO, Jokin; SCHORN-GARCÍA, Daniel. How are chemometric models validated? A systematic review of linear regression models for NIRS data in food analysis. **Journal of Chemometrics**, v. 39, n. 6, maio 2025. <https://doi.org/10.1002/cem.70036>.
- FANCHONE, A *et al.* Comparison of fecal crude protein and fecal near-infrared reflectance spectroscopy to predict digestibility of fresh grass consumed by sheep. **Journal of Animal Science**, v. 87, n. 1, p. 236–243, jan. 2009. <https://doi.org/10.2527/jas.2007-0817>.

- FANCHONE, A *et al.* Faecal indices based on near infrared spectroscopy to assess intake, in vivo digestibility and chemical composition of the herbage ingested by sheep (crude protein, fibres and lignin content). **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 15, p. 107-113, 2007. <https://doi.org/10.1255/jnirs.720>.
- FERREIRA, Marcus *et al.* Determination of pitaya quality using portable NIR spectroscopy and innovative low-cost electronic nose. **Scientia Horticulturae**, v. 310, fev. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111784>.
- FUENTES-PILA, Joaquin *et al.* Evaluation of equations based on animal factors to predict intake of lactating Holstein cows. **Journal of Dairy Science**, v. 79, n. 9, p. 1562–1571, set. 1996. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(96\)76518-9](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(96)76518-9).
- GINDRI, Marcelo *et al.* Comparison of methods to estimate crude protein and digestible organic matter content of diets ingested by free-ranging sheep. **Small Ruminant Research**, v. 178, p. 37-42, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2019.06.023>.
- GRAÇAS, Larissa. Espectroscopia de reflectância no infravermelho próximo de fezes para prever variáveis nutricionais de vacas leiteiras confinadas. Dissertação de Mestrado. Lavras: Universidade Federal de Lavras; 2021.
- HALLS, Lowell. The approximation of cattle diet through herbage sampling. **Journal of Range Management**, v. 7, n. 6, p. 269–270, 1954.
- HOLLOWAY, John. Relationship between fecal components and forage consumption and digestibility. **Journal of Animal Science**, v. 52, n. 4, p. 836–848, abr. 1981. <https://doi.org/10.2527/jas1981.524836x>.
- JOHNSON, John *et al.* Application of fecal near-infrared reflectance spectroscopy profiling for the prediction of diet nutritional characteristics and voluntary intake in beef cattle. **Journal of Animal Science**, v. 95, n. 1, p. 447–454, jan. 2017. <https://doi.org/10.2527/jas.2016.0845>.
- KOZLOSKI, Gilberto *et al.* Faecal N excretion as an approach for estimating organic matter intake by free-ranging sheep and cattle. **The Journal of Agricultural Science**, v. 156, n. 3, p. 443–449, abr. 2018. <https://doi.org/10.1017/S0021859618000412>.
- LANCASTER, R. Estimation of digestibility of grazed pasture from faeces nitrogen. **Nature**, v. 163, p. 330–331, 1949. <https://doi.org/10.1038/163330b0>.
- LANDAU, Serge *et al.* Faecal near-IR spectroscopy to determine the nutritional value of diets consumed by beef cattle in east Mediterranean rangelands. **Animal**, v. 10, n. 2, p. 192–202, fev. 2016. <https://doi.org/10.1017/s175173111500169x>.

- LANDAU, Serge *et al.* Impact of animal density on cattle nutrition in dry Mediterranean rangelands: a faecal near-IR spectroscopy-aided study. **Animal**, v. 12, n. 2, p. 265-274, maio 2017. <https://doi.org/10.1017/s1751731117001422>.
- LEITE, Eneas; STUTH, Jerry. Fecal NIRS equations to assess diet quality of free-ranging goats. **Small Ruminant Research**, v. 15, n. 3, p. 223–230, fev. 1995. [https://doi.org/10.1016/0921-4488\(94\)00026-4](https://doi.org/10.1016/0921-4488(94)00026-4).
- LOPEZ, Eneko *et al.* The importance of choosing a proper validation strategy in predictive models: a tutorial with real examples. **Analytica Chimica Acta**, v. 1275, set. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.341532>.
- LUKAS, Monika *et al.* Relationship between fecal crude protein concentration and diet organic matter digestibility in cattle. **Journal of Animal Science**, v. 83, n. 6, p. 1332–1344, jun. 2005. <https://doi.org/10.2527/2005.8361332x>.
- LYONS, Robert; STUTH, Jerry. Fecal NIRS equations for predicting diet quality of free-ranging cattle. **Journal of Range Management**, v. 45, n. 3, p. 238–244, maio 1992. <https://doi.org/10.2307/4002970>.
- MARTENS, Harald; NAES, Tormod. **Multivariate calibration**. Chichester: John Wiley & Sons, 1992.
- MOLLE, Giovanni *et al.* Fecal NIRS to estimate intake and diet composition in Sarda dairy ewes fed mixed diets or part-time grazing forage crops. **Small Ruminant Research**, v. 227, out. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2023.107084>.
- MOURA, Andrezza *et al.* Use of indicators in studies of animal nutrition. **PUBVET**, Londrina, v. 7, n. 24, dez. 2013. <https://doi.org/10.22256/pubvet.v7n24.1634>.
- NÚÑEZ-SANCHEZ, Nieves *et al.* Evaluation of botanical and chemical composition of sheep diet by using faecal near infrared spectroscopy. **Animal Feed Science and Technology**, v. 222, p. 1-6, dez. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.09.010>.
- OLIVEIRA, Daniel. Predictability of dry matter intake, diet composition and digestibility in beef cattle using fecal near-infrared reflectance spectroscopy. Dissertação de mestrado. Lavras: Universidade Federal de Lavras; 2019.
- PARRA-FORERO, Diana *et al.* Use of near-infrared reflectance spectroscopy on feces to estimate digestibility and dry matter intake of dietary nutritional characteristics under grazing conditions in Colombian creole steers. **Tropical Animal Health and Production**, v. 55, n. 178, abr. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03571-x>.
- PENNING, P. D. **Herbage intake handbook**. Reading: The British Grassland Society, 2004.

- PERIPOLLI, Vanessa *et al.* Fecal nitrogen to estimate intake and digestibility in grazing ruminants. **Animal Feed Science and Technology**, v. 163, n. 2–4, p. 170–176, fev. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2010.11.008>.
- PETERS, Jenilee *et al.* Predicting fecal composition, intake, and nutrient digestibility in beef cattle consuming high forage diets using near infrared spectroscopy. **Translational Animal Science**, v. 7, n. 1, maio 2023. <https://doi.org/10.1093/tas/txad043>.
- ROSSA, Mariana *et al.* Predicting fiber content in herbivore fecal samples using a multispecies NIRS model. **PLOS ONE**, v. 20, n. 1, jan. 2025. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0317145>.
- SANTOS, Thayná *et al.* A decision support alternative method through NIR spectroscopy and MCC-PCA in the evaluation of *Salmonella spp.* in bovine meat and bone meal. **Food Research International**, v. 209, maio 2025. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116215>.
- SAVIAN, Jean *et al.* Comparison of fecal crude protein and n-alkanes techniques to estimate herbage intake by grazing sheep. **Animal Feed Science and Technology**, v. 242, p. 144–149, ago. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.06.010>.
- SCHLECHT, Eva; SUSENBETH, Andreas. Estimating the digestibility of Sahelian roughages from faecal crude protein concentration of cattle and small ruminants. **Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition**, v. 90, n. 9–10, p. 369–379, out. 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2005.00596.x>.
- SILVA, Igor. Uso da espectroscopia NIR para monitoramento nutricional de ovinos em pastagens de capim-mombaça. Dissertação de mestrado. Sobral: Universidade Estadual Vale do Acaraú; 2020.
- STUTH, Jerry; JAMA, Abdi; TOLLESON, Doug. Direct and indirect means of predicting forage quality through near infrared reflectance spectroscopy. **Field Crops Research**, v. 84, n. 1–2, p. 45–56, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00140-0](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00140-0).
- TOLLESON, Doug; ANGERER, Jay. The application of near infrared spectroscopy to predict faecal nitrogen and phosphorus in multiple ruminant herbivore species. **The Rangeland Journal**, jan. 2021. <https://doi.org/10.1071/RJ20071>.
- TOLLESON, Doug; SCHAFER, D. Application of fecal near-infrared spectroscopy and nutritional balance software to monitor quality and body condition in beef cows grazing Arizona rangeland. **Journal of Animal Science**, v. 92, n. 1, p. 349–358, jan. 2014. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6631>.
- TOLLESON, Douglas *et al.* Nutritional monitoring of rangeland beef cattle in the Edwards Plateau of Texas using region-specific fecal near-infrared

- spectroscopy predictions of diet quality. **Rangelands**, v. 47, n. 2, p. 109–117, abr. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rala.2024.11.004>.
- TRÓPIA, Nathália *et al.* Regression models from portable NIR spectra for predicting the carcass traits and meat quality of beef cattle. **PLOS ONE**, v. 19, n. 5, maio 2024. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0303946>.
- VAN SOEST, Peter Jan. **Nutritional ecology of the ruminant**. 2. ed. New York: Cornell University Press, 1994.
- VILLAMUELAS, Miriam *et al.* Predicting herbivore faecal nitrogen using a multispecies near-infrared reflectance spectroscopy calibration. **PLOS ONE**, v. 12, n. 4, abr. 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176635>.
- WANG, Chengjie *et al.* Fecal crude protein content as an estimate for the digestibility of forage in grazing sheep. **Animal Feed Science and Technology**, v. 149, n. 3–4, p. 199–208, mar. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2008.06.005>.
- WILLIAMS, P. **Near-infrared technology, getting the best out of light: a short course in the practical implementation of near-infrared spectroscopy for the user**. Sidney: PDK Grain, 2004.
- WILLIAMS, P.; NORRIS, K. **Near-infrared technology in the agricultural and food industries**. 2. ed. Minnesota: American Association of Cereal Chemists, 2001.
- XU, Yiming *et al.* Application of near-infrared reflectance spectroscopy for predicting chemical composition of feces in Holstein dairy cows and calves. **Animals**, v. 14, n. 52, dez. 2023. <https://doi.org/10.3390/ani14010052>.
- YU, Huijing *et al.* Novel automatic model construction method for the rapid characterization of petroleum properties from near-infrared spectroscopy. **Fuel**, v. 316, maio 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123101>.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Brasil: projetos 478418/2013-2 e 310629/2022-5), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS; projeto número 23/2551-0000892-0), e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001.

Autores

Eliaana Bordin Dutra, Lucas Biscaglia Miranda, Eduarda Jahnke Kepplin, Rafaela Rorato de Oliveira, Eduardo Bohrer de Azevedo

Departamento de Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

CAPÍTULO 10

Programação fetal em bovinos de corte: impactos da nutrição materna na produtividade da progênie

Raíssa Lixinski de Souza, Maurício Martins de Souza, Rodrigo Soares Volpato, Matheus Dutra Teixeira, Dari Celestino Alves Filho

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-39-8.c10>

Resumo

Este capítulo de revisão detalha a Programação Fetal (PF) em bovinos de corte, um mecanismo epigenético onde a nutrição materna estratégica durante a gestação define o potencial produtivo e reprodutivo da progênie. A gestação bovina é dividida em três terços, cada um apresentando janelas críticas de desenvolvimento: o terço inicial (T1) estabelece a capacidade logística de suporte fetal, através da formação da placenta e dos órgãos vitais, o terço médio (T2) é a janela crucial para a maximização do potencial de carne magra, pois é onde ocorre a hiperplasia muscular e o terço final (T3) modula a qualidade da carcaça, por meio da adipogênese intramuscular (marmoreio), e a competência imunológica neonatal. A restrição nutricional no T2 limita permanentemente o número de fibras musculares, resultando em menor ganho de peso diário na fase adulta. Já a deficiência no T3 compromete o marmoreio e a saúde do bezerro. A PF induzida pela restrição gera um fenótipo "econômico", mais resiliente em ambientes desafiadores, mas subótimo em sistemas intensivos. O manejo do Escore de Condição Corporal (ECC) da matriz (ideal $3,5 \pm 0,5$) é crucial para mitigar o balanço energético negativo pós-parto e garantir o sucesso reprodutivo subsequente da vaca. Conclui-se que o timing correto da suplementação é um investimento fundamental que otimiza a eficiência, a produtividade e a qualidade da carne na pecuária de corte.

Palavras chaves: bovinocultura de corte, eficiência reprodutiva, condição corporal, qualidade de carcaça, suplementação.

1. Introdução

A utilização de tecnologias dentro da bovinocultura de corte no Brasil, normalmente está ligada às categorias mais eficientes, seja na fase de recria, ou

até mesmo na fase de engorda. Mas quando falamos em bovinocultura de corte, não podemos esquecer o principal mecanismo de funcionamento do sistema, as vacas. Na grande maioria dos sistemas essa categoria está marginalizada na fazenda, em sistemas extensivos, onde a atenção a ela está ligada ao quanto ela está produzindo, se é eficiente para o sistema. Embora economicamente viável, impõe desafios significativos, principalmente para as matrizes gestantes que possuem maiores exigências nutricionais justamente em períodos em que a qualidade das pastagens é inferior, seja durante o inverno nas regiões Sul, ou durante a estação seca nas demais regiões do país. Onde na maioria das vezes, essas pastagens não conseguem suprir as exigências nutricionais das vacas durante sua gestação (Gutiérrez *et al.*, 2014; Klein *et al.*, 2024).

De acordo com Colazo *et al.* (2009), vacas de corte submetidas à restrição alimentar no período pré-parto tendem a apresentar perda de peso e redução no escore de condição corporal ao parto, o que acarreta em um maior intervalo parto-primeiro cio e, conseqüentemente, em um intervalo parto-concepção mais longo. Portanto o correto manejo das vacas durante a fase de cria pode ter impacto direto no número de bezerros produzidos, bem como influenciar o potencial produtivo da progênie após o nascimento (Klein *et al.*, 2022).

O presente capítulo traz como objetivo apresentar de forma simples o impacto que a correta nutrição durante a gestação pode trazer para o sistema produtivo, sendo diretamente na vaca ou até mesmo indiretamente na progênie. Esse manejo diferente do comum da maioria das propriedades brasileiras é chamado de programação fetal, que consiste em apresentar uma estratégia focada em uma determinada fração da gestação.

2. Fundamentos da programação fetal em bovinos

2.1. Janelas de desenvolvimento e períodos críticos da gestação bovina

O desenvolvimento fetal em bovinos é um processo intrinsecamente dependente da nutrição materna, a qual atua como o principal modulador ambiental do crescimento e da diferenciação celular (Klein *et al.*, 2021). A gestação compreende janelas de desenvolvimento altamente sensíveis, nas

quais a restrição ou suplementação de nutrientes deve ser precisamente ajustada ao timing dos eventos biológicos que ocorrem em cada fase.

A duração média da gestação bovina é de aproximadamente 280 a 285 dias, podendo variar ligeiramente conforme a raça e o sexo do feto. Para fins de manejo nutricional e análise da programação fetal, esse período é convencionalmente dividido em três terços gestacionais (trimestres), cada um caracterizado por especificidades fisiológicas e demandas metabólicas distintas.

2.1.1. Cronologia gestacional bovina

O crescimento fetal em condições normais segue um padrão sigmoidal. O desenvolvimento é relativamente lento nas fases iniciais, mas a taxa de ganho de peso fetal aumenta exponencialmente a partir de aproximadamente 50 dias de gestação, atingindo valores máximos próximos a 0,35 kg/dia por volta dos 230 dias (Prior e Lester, 1979; Bergamaschi, 2001). Essa aceleração no terço final impõe às maiores exigências nutricionais sobre a matriz, sendo este o período mais crítico para o fornecimento adequado de nutrientes.

A divisão técnica para fins de manejo nutricional e estudos de programação fetal pode ser descrita da seguinte forma:

- Primeiro Terço (T1): Dias 1 a aproximadamente 90 (Meses 1 a 3)

O primeiro terço da gestação representa a fase de menor demanda nutricional absoluta para o feto devido ao seu tamanho reduzido, mas é o período de maior importância para o estabelecimento da infraestrutura que irá suportar o crescimento subsequente e a determinação do potencial produtivo de longo prazo.

- Segundo Terço (T2): Dias 91 a aproximadamente 180 (Meses 4 a 6)

O segundo terço da gestação é metabolicamente dominado pela hiperplasia celular, ou seja, o aumento no número de células em diversos tecidos. Esta é a janela mais crítica para a determinação do potencial de crescimento em termos de massa muscular.

- Terceiro Terço (T3): Dias 181 ao parto (Meses 7 a 9)

O terço final da gestação é o período de maior demanda energética e proteica para a matriz, caracterizado pelo crescimento fetal exponencial e pela maturação final dos sistemas. Estima-se que até 90% do peso fetal ao nascimento seja adquirido neste período (Bergamaschi, 2001).

Tabela 1. Cronologia e eventos celulares-chave da gestação bovina

Período Gestacional	Foco fisiológico	Eventos celulares	Peso fetal (Relativo)
T1	Organogênese e Implantação Placentária	Diferenciação de Órgãos Vitais, Miogênese Primária, Angiogênese	Baixo (Crescimento lento)
T2	Determinação Estrutural e Hiperplasia	Miogênese Secundária (Definição do número de fibras musculares), Início da Adipogênese	Moderado (Aumento da taxa de crescimento)
T3	Crescimento Fetal Exponencial e Maturação	Hipertrofia Muscular, Adipogênese Intensa (Marmoreio), Desenvolvimento Imunológico	Alto (Máxima taxa de ganho de peso)

A ingestão de nutrientes pela vaca gestante é reconhecida como um dos fatores mais significativos na modulação do ambiente uterino e, consequentemente, do potencial produtivo da prole. As alterações induzidas pela PF são mediadas por mecanismos epigenéticos, que são modificações na expressão de genes (como a metilação do DNA e a modificação das histonas) sem alterar a sequência de DNA do indivíduo (Amorin e Almeida, 2024). Essas alterações epigenéticas permitem uma adaptação rápida do feto ao ambiente uterino.

Em sistemas de produção de corte no Brasil, a relevância da programação fetal é amplificada pela variação sazonal na disponibilidade e qualidade dos nutrientes do pasto, especialmente durante o período seco, o que expõe frequentemente as vacas gestantes a períodos de restrição (Klein *et al.*, 2021). O reconhecimento de que a nutrição materna na gestação pode alterar a formação fetal, com efeitos persistentes na vida adulta da progênie, torna o manejo

nutricional da matriz uma ferramenta estratégica para otimizar a eficiência produtiva (Silva, 2021).

3. Efeitos da programação fetal no desempenho produtivo da progênie

3.1. Desenvolvimento muscular (miogênese)

A formação do músculo esquelético é um processo bifásico no feto: hiperplasia (aumento do número de células) e hipertrofia (aumento do tamanho das células).

3.1.1. Miogênese primária e determinação inicial de fibras (T1)

A miogênese primária, que envolve o comprometimento celular à linhagem miogênica, ocorre no T1. Embora a demanda absoluta de nutrientes para o feto seja menor, o estabelecimento da estrutura inicial ocorre neste período.

3.1.2. Miogênese secundária e hiperplasia (T2): impacto da proteína e energia

O T2 é a fase mais crucial para definir o potencial produtivo de carne magra. É aqui que ocorre a miogênese secundária e a hiperplasia muscular. O processo de hiperplasia é restrito ao período fetal e não pode ser compensado após o nascimento (Du *et al.*, 2013). A restrição de nutrientes, especialmente proteína e energia, durante o T2 reduz o número total de fibras musculares. Como o crescimento muscular pós-natal ocorre apenas por hipertrofia das fibras pré-existentes, uma redução no número inicial de fibras limita severamente a capacidade de ganho de peso diário e o rendimento de carcaça do animal na fase adulta (Du *et al.*, 2010).

3.1.3. Hipertrofia muscular e a fase final da gestação (T3)

No T3, o feto passa por um crescimento acelerado e o músculo esquelético cresce predominantemente por hipertrofia. Embora a restrição

nutricional neste período não afete o número de fibras, ela reduz o tamanho das fibras musculares e a densidade das células satélites. As células satélites são essenciais para a hipertrofia pós-natal, portanto, a deficiência no T3 limita o crescimento muscular subsequente. Funston *et al.* (2009) demonstraram que a nutrição materna adequada no T3 resultou em peso final superior nos novilhos.

3.2. Desenvolvimento adiposo e qualidade da carcaça

A adipogênese, processo de formação de células de gordura (adipócitos), se inicia no T2, sobrepondo-se à miogênese secundária. Existem quatro depósitos de gordura em bovinos (visceral, subcutânea, intermuscular e intramuscular). A formação de gordura visceral começa na metade da gestação, enquanto a gordura subcutânea (cobertura) se forma um pouco mais tarde, entre o T2 e o início do desmame.

A gordura intramuscular, conhecida como marmoreio, é crítica, pois contribui diretamente para a maciez, palatabilidade e suculência da carne, fatores altamente valorizados pelos consumidores. O desenvolvimento do marmoreio é estimado para ocorrer intensamente no final da gestação (T3), estendendo-se até cerca de 250 dias de idade, um período denominado "Janela de Marmoreio" (Du *et al.*, 2013). A restrição nutricional no T3 prejudica a adipogênese e, conseqüentemente, a formação do marmoreio e a hipertrofia muscular. Estudos demonstraram que a suplementação da matriz no último trimestre de gestação resultou em um maior escore de marmoreio e maior espessura de gordura de cobertura na carcaça da progênie (Funston *et al.*, 2010).

3.3. Desempenho pós-natal

A nutrição materna define aspectos como peso ao nascimento, peso à desmama, peso vivo final no confinamento e ganho de peso diário da progênie. Em um estudo com vacas Canchim, a suplementação proteica que visava atender 75% da exigência (consumo real de 57%) no final da gestação não interferiu no desempenho dos bezerros até os 60 dias de vida, embora a matriz tenha apresentado menor ganho de peso pós-parto. Isso sugere que os efeitos

da programação podem ser mais sutis ou tardios, ou que a restrição não foi severa o suficiente para causar impacto imediato na produtividade inicial do bezerro (Silva *et al.*, 2021).

A restrição materna pode induzir um fenótipo "econômico" no feto, caracterizado por adaptações metabólicas que o preparam para um ambiente de baixa disponibilidade de nutrientes (Klein *et al.*, 2021). A Programação Fetal, neste contexto, é uma ferramenta de adaptação seletiva, e não necessariamente de maximização absoluta do crescimento. Pesquisas demonstram que novilhos cujas mães foram submetidas à restrição nutricional no T3 (RES) se sobressaíram em ambientes desafiadores. Em contraste, animais provenientes de vacas adequadamente suplementadas (REQ ou HIGH) desempenharam melhor em ambientes nutricionalmente favoráveis, como o confinamento (Klein *et al.*, 2023).

Essa adaptação envolve mudanças fisiológicas; animais programados (RES e HIGH) podem apresentar um peso relativo maior do rúmen e do trato gastrointestinal (TGI) em comparação com os animais REQ (100% da exigência). Esse desenvolvimento compensatório do TGI pode ser uma estratégia para otimizar a absorção de nutrientes em condições de restrição. A conclusão é que o manejo de programação deve ser alinhado com o destino do bezerro: se o animal será terminado em confinamento intensivo, o fenótipo REQ/HIGH é mais adequado; se permanecerá em pastagens de baixa qualidade, o fenótipo RES pode apresentar maior resiliência e eficiência.

3.4. Implicações reprodutivas na progênie

A Programação Fetal pode impactar permanentemente a fertilidade futura da progênie (Amorin e Almeida, 2024; Larson *et al.*, 2009). A restrição nutricional no T1 pode comprometer o desenvolvimento dos órgãos reprodutivos. Uma suplementação adequada em novilhas se correlaciona com melhorias significativas nas taxas de estro, prenhez e parição. A manifestação de estro é reflexo do ganho de peso e do Escore de Condição Corporal (ECC) ao final do período reprodutivo (Vaz *et al.*, 2012).

3.5. Saúde e resposta imune

A subnutrição materna durante janelas críticas têm implicações diretas na saúde neonatal. A baixa Condição Corporal da matriz ao parto (refletindo nutrição inadequada no T3) está associada a uma menor concentração sérica de Imunoglobulinas (Ig) no bezerro nas primeiras 24 horas de vida, indicando uma falha na transferência de imunidade passiva (TIP) (Lemaster *et al.*, 2017). A TIP é essencial para a transferência de anticorpos, prevenindo a suscetibilidade a infecções (Perino *et al.*, 1995).

A subnutrição materna pode causar efeitos permanentes no sistema imunológico da prole. Animais programados sob restrição podem apresentar diminuição na resposta humoral induzida pela vacinação, redução na resposta inflamatória e menor capacidade de lidar com o estresse fisiológico após o desmame. Tais alterações aumentam a susceptibilidade a infecções bacterianas e virais (Lemaster *et al.*, 2017).

4. Estratégias de manejo e nutrição materna

4.1. Suplementação estratégica

A suplementação deve ser calibrada de acordo com as janelas críticas do desenvolvimento fetal:

- T1 (Capacidade Placentária e Órgãos): Foco em assegurar a formação da placenta e dos órgãos vitais, prevenindo o comprometimento da fundação do crescimento subsequente (Mendes, 2016).
- T2 (Maximização Muscular): Suplementação proteica e energética para maximizar a hiperplasia muscular, definindo o potencial máximo de massa magra do bezerro (Du *et al.*, 2010).
- T3 (Qualidade de Carcaça e Reservas Maternas): Suplementação para promover a hipertrofia muscular e a adipogênese intramuscular (marmoreio) no bezerro, além de garantir reservas para a matriz (Du *et al.*, 2013). A suplementação proteica adequada no T3 promoveu maior ganho de peso nas matrizes no pós-parto, auxiliando na recuperação e no desempenho reprodutivo (Silva *et al.*, 2021).

4.2. Manejo de condição corporal (ECC) da matriz

O ECC é fundamental para auxiliar na definição de lotes e estratégias de suplementação. O ECC ideal de $3,5 \pm 0,5$ (em uma escala de 1 a 5) é a prioridade para alcançar altas taxas de prenhez em programas de IATF. Vacas com menor ECC no parto e na estação de monta diminuem os resultados de prenhez, sendo as primíparas as mais sensíveis a menores planos nutricionais (Carvalho, 2017).

Vacas que produzem bezerros mais pesados no desmame são as que mais mobilizam reservas corporais e, portanto, necessitam de maior suporte nutricional no pós-parto. Uma estratégia de manejo eficaz é adiantar a desmama dos bezerros de primíparas para permitir que as matrizes recuperem o ECC antes da próxima estação de monta (Carvalho, 2017).

5. Considerações finais

Programação Fetal oferece uma tecnologia de gestão que permite a manipulação intencional do potencial produtivo por meio do timing nutricional. O gerenciamento preciso das janelas críticas (T1 para capacidade placentária, T2 para hiperplasia muscular e T3 para qualidade de carcaça e reservas maternas) é a chave para a otimização da pecuária. O ECC da matriz (ideal 3,5) é um indicador prático que correlaciona o manejo fetal com o sucesso reprodutivo da mãe e a saúde inicial do bezerro.

Ainda existem lacunas significativas no entendimento dos efeitos transgeracionais da programação fetal em bovinos. É fundamental que estudos futuros avaliem como as alterações metabólicas e epigenéticas decorrentes da restrição ou suplementação materna podem ser transmitidas às gerações subsequentes, influenciando parâmetros como eficiência reprodutiva, desempenho produtivo e adaptabilidade metabólica do rebanho (Amorim e Almeida, 2024).

6. Referências bibliográficas

AMORIN, Fernanda; ALMEIDA, Jaci. Programação fetal bovina: possíveis implicações na reprodução e na progênie. **Revista Saber Digital**, v. 17, n.3,

e20241707, set./dez., 2024.
<https://doi.org/10.24859/SaberDigital.2024v17n3.1598>.

BERGAMASCHI, Marcos. **Efeito do genótipo paterno e sistemas de pastejo no desenvolvimento fetal e nas características ao nascimento de bovinos**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2001.

Carvalho, Rafael. **Influência da alteração do escore de condição corporal e de hormônios metabólicos pós-parto na eficiência reprodutiva de vacas nelore inseminadas em tempo fixo**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2017.

COLAZO, Marcos *et al.* Reproductive performance of dairy cows is influenced by prepartum feed restriction and dietary fatty acid source. **Journal of Animal Science**, v. 92, p. 2562-2571, 2009.

DU, Min *et al.* Fetal programming of skeletal muscle development in ruminant animals. **Journal of Animal Science**, Champaign, v.88 (E. Suppl.), p.51- 60, 2010.

DU, Min *et al.* Manipulating mesenchymal progenitor cell differentiation to optimize performance and carcass value of beef cattle. **Journal Animal Science**, v.91, n.3, p.1419-1427, 2013.

FUNSTON, Richard *et al.* Effect of Winter Grazing System and Supplementation on Beef Cow and Progeny Performance. **Nebraska Beef Report**, 2009. <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1507&context=animalscinbcr> (Acessado 8 de outubro de 2025)

FUNSTON, R. N., Larson, D. M., Vonnahme, K. A. Effects of maternal nutrition on conceptus growth and offspring performance: implications for beef cattle production. **Journal of animal science**, 88(13 Suppl), E205–E215, 2010. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-2351>.

GUTIÉRREZ, V. *et al.* Effects of calf early nutrition on muscle fiber characteristics. **Livestock Science**, v. 166, p. 1-8, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.07.010>.

KLEIN, John *et al.* Fetal programming and the consequences on progeny development - a review. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 12, p. 1-11, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20766>.

KLEIN, John *et al.* Efeitos da nutrição no terço final da gestação de vacas de corte sobre o desenvolvimento da progênie. **Revista Mexicana de Ciências Pecuárias**, [S. l.], v. 13, n.º 3, p. 658–673, 2022. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i3.6015>.

KLEIN, John *et al.* Efeito da nutrição materna no terço final da gestação sobre a composição corporal da progênie ao abate. **Ciência Animal Brasileira**, v. 24, e-74730P, 2023.

<https://www.scielo.br/j/cab/a/fgdnWmytfRbrjKmp8L7WN9N/?format=pdf&lang=pt> (Acessado 9 de outubro de 2025).

KLEIN, John *et al.* Variation in cow body condition score during the final third of gestation and its effects on progeny performance. **Semina: Ciências Agrárias**, [S. l.], v. 44, n. 6, p. 2163–2178, 2024. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2023v44n6p2163>.

LEMASTER, C. T. *et al.* The effects of late gestation maternal nutrient restriction with or without protein supplementation on endocrine regulation of newborn and postnatal beef calves. **Theriogenology**, 87, 64–71, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.08.004>.

MENDES, Luisa. **O efeito da nutrição materna sobre o desenvolvimento fetal e o seu impacto na constituição da carcaça bovina**. Monografia (Curso de Veterinária) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PERINO, L.J.; SUTHERLAND, R.L.; WOOLLEN, N.H. Colostral absorption of immunoglobulins G and M in newborn calves. **Am. J. Vet. Res.**, v. 56, n. 6, p. 755-760, 1995.

PRIOR, R.L.; LASTER, D.B. Development of the bovine fetus. **Journal of Animal Science**, v. 48, n. 6, p. 1546-1553, 1979.

SILVA, Ramon. **Estratégias de suplementação no desempenho de vacas e bezerros Canchim**. Dissertação (Mestrado em Produção Animal) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

VAZ, Ricardo *et al.* Desempenho de novilhas de corte até o parto recebendo diferentes níveis de suplementação durante o período reprodutivo, aos 14 meses de idade. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, n. 3, p. 797-806, 2012. <https://www.scielo.br/j/rbz/a/nxzcSkt6kQwM7w4bW8L55hr/?format=pdf&lang=pt> (Acessado 9 de outubro de 2025).

Agradecimentos

Agradecemos o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes).

Autores

Raíssa Lixinski de Souza, Maurício Martins de Souza, Rodrigo Soares Volpatto, Matheus Dutra Teixeira, Dari Celestino Alves Filho

Departamento de Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

CAPÍTULO 11

Impacto do consórcio gramínea-leguminosa na dinâmica do carbono no solo e gases de efeito estufa

Monique Évelyn de Lima Pacheco, Francine Basso Facco, Paola de Oliveira Selau, Kamily Pech Oliveira, Amanda Zucheto, Caroline Frozza, Thainara Fagundes, Julio Viégas

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-39-8.c11>

Resumo

O capim-elefante se destaca por seu elevado potencial de produção forrageira em diversas regiões do Brasil. Em muitas propriedades, o cultivo desse capim é realizado de forma intensiva, com a aplicação de grandes quantidades de fertilizantes minerais, principalmente os nitrogenados, o que torna a produção mais cara e menos sustentável. Nesse contexto, a combinação do capim-elefante com leguminosas forrageiras pode tornar o sistema mais eficiente e reduzir os impactos ambientais. O cultivo consorciado de gramíneas e leguminosas não só mantém a produtividade da gramínea associada, como também amplia a oferta de pastagem em sistemas mistos, podendo contribuir para o aumento do estoque de carbono (C) no solo. O sequestro de carbono no solo surgiu como uma estratégia promissora para combater as mudanças climáticas, mas a dinâmica do carbono em sistemas que utilizam gramíneas consorciadas ainda é pouco compreendida. Além disso, são limitadas as informações sobre o balanço de gases de efeito estufa nesses sistemas.

Palavras-chave: capim-elefante, leguminosas, sequestro de carbono, impactos ambientais.

1. Introdução

As pastagens constituem a base da alimentação de aproximadamente 86% do rebanho bovino brasileiro (ABIEC, 2020). O país reúne condições edafoclimáticas favoráveis ao cultivo de diferentes espécies forrageiras de alto

potencial produtivo, tanto de verão, como o capim-elefante, quanto de inverno, como trigo e azevém. Em muitos casos, essas gramíneas podem ser consorciadas com leguminosas, como o amendoim forrageiro e o trevo vesiculoso, elevando a oferta de forragem e contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas de produção.

Apesar deste potencial, falhas de manejo relacionadas ao estabelecimento da cultura, à intensidade e frequência de pastejo e à baixa fertilidade do solo ainda resultam em degradação de pastagens (Terra *et al.*, 2019). Sistemas consorciados de gramíneas com leguminosas têm se mostrado alternativas promissoras, pois permitem manter a capacidade produtiva da gramínea acompanhante, aumentam a oferta de forragem e podem contribuir para o aumento do estoque de carbono (C) no solo (Terra *et al.*, 2019). O sequestro de C em solo cultivados com pastagens surgiu como uma estratégia para frente às mudanças climáticas. Entretanto, a dinâmica do C em sistemas consorciados ainda é pouco conhecida (Minasny *et al.*, 2017), e informações sobre o balanço de gases de efeito estufa (GEE), como óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4), são escassas. Esses gases podem comprometer os ganhos ambientais obtidos com o sequestro de carbono, sobretudo quando o uso de leguminosas ou a adubação nitrogenada estimulam a emissão de N_2O (Terra *et al.*, 2019).

Diante disso, surge a necessidade de entender de forma integrada a produtividade, o valor nutritivo das pastagens, a dinâmica do carbono no solo e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em sistemas consorciados.

2. Pastagens como base dos sistemas de produção

As pastagens ocupam um papel central na bovinocultura de leite, especialmente no Brasil, onde a maioria dos produtores ainda utilizam sistemas baseados no pastejo. Essa realidade está associada à ampla disponibilidade de terras e às condições climáticas favoráveis ao crescimento de forrageiras de elevado potencial produtivo (Pereira *et al.*, 2020). Além do aspecto econômico, as pastagens também influenciam positivamente o bem-estar animal, a qualidade do leite produzido e a sustentabilidade dos sistemas de produção, ao

contribuírem para a ciclagem de nutrientes, a conservação do solo e o sequestro de carbono (Terra *et al.*, 2019).

O Brasil dispõe de ampla diversidade de espécies forrageiras, tanto tropicais quanto subtropicais, o que possibilita diferentes arranjos produtivos ao longo do ano. Entre as gramíneas de verão destacam-se o capim-elefante (*Pennisetum purpureum*), as espécies do gênero *Urochloa* e os capins do gênero *Cynodon*, que apresentam elevado potencial produtivo e boa adaptação às condições climáticas nacionais (Bratz *et al.*, 2019; Silveira *et al.*, 2019). Para o período de inverno, espécies anuais como o azevém (*Lolium multiflorum*), a aveia (*Avena sativa*) e o trigo (*Triticum aestivum* L.) assumem papel fundamental, sobretudo nas regiões Sul e Sudeste, onde a sazonalidade climática limita o crescimento das espécies tropicais (Fontaneli *et al.*, 2012). Muitas dessas culturas podem ainda ser utilizadas em consórcio com leguminosas, como o amendoim forrageiro (*Arachis pintoï*) e o trevo vesiculoso (*Trifolium vesiculosum*), proporcionando maior estabilidade na produção de forragem e incremento no valor nutritivo (Olivo *et al.*, 2017).

Sistemas consorciados entre gramíneas e leguminosas surgem como alternativas de grande interesse, uma vez que favorecem a estabilidade produtiva, reduzem a necessidade de adubação nitrogenada e podem contribuir para a mitigação das emissões de GEE (Macedo *et al.*, 2014). Entre as combinações possíveis, o consórcio de capim-elefante com amendoim forrageiro se destaca pela complementaridade entre o elevado potencial produtivo da gramínea e a capacidade da leguminosa em fixar nitrogênio e melhorar o valor nutritivo da dieta animal.

2.1. Capim-elefante

O capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) é originário da África Tropical, Zimbabwe. Essa gramínea é considerada bastante versátil, com boa adaptação a diferentes condições de relevos e tipos de solo, além de excelente desempenho em regiões tropicais e subtropicais (Bratz *et al.*, 2019), exceto em áreas sujeitas a encharcamento (Silveira *et al.*, 2019). Na região Sul do Brasil, o capim-elefante apresenta grande estacionalidade em razão das baixas

temperaturas e ocorrência de geadas, ocasionando variações na produção e valor nutritivo da forragem, refletindo em oscilações que podem limitar o desempenho animal (Daher *et al.*, 2017). Destaca-se, no entanto, que mesmo em períodos de menor crescimento, como no outono e início do inverno, o capim-elefante tende a apresentar melhor qualidade nutricional em relação à forragem produzida no verão (Bratz *et al.*, 2019).

Do ponto de vista produtivo, o capim-elefante possui elevado potencial, podendo alcançar rendimentos superiores a 30 t/ha/ano em sistemas de policultivo sob pastejo (Bratz *et al.*, 2019). Quando bem manejado, em lotação rotacionada, pode se manter produtivo por décadas, com alta produtividade e elevado valor nutricional, e com reduzido impacto ambiental (Olivo *et al.*, 2017; Seibt *et al.*, 2021).

2.2. Amendoim forrageiro

Dentre as poucas leguminosas valorizadas como pastagem, o amendoim forrageiro (*Arachis pintoi* Krap. & Greg.) vem ganhando destaque nos sistemas pecuários (Nascimento, 2006). Trata-se de uma leguminosa perene de verão, nativa da América do Sul, com ocorrência principalmente no Brasil, Paraguai e Argentina (Fontaneli *et al.*, 2012). A introdução da espécie ocorreu em 1954, quando o professor Geraldo C. Pinto coletou um único acesso do gênero *Arachis* no município de Belmonte, na Bahia, fato que marcou o início de sua utilização como forrageira.

O amendoim forrageiro pode ser utilizado em diversos sistemas de produção, incluindo sistemas silvipastoris e agroecológicos, dada sua tolerância ao sombreamento e variabilidade de condições ambientais (Barro *et al.*, 2012). Além disso, apresenta boa capacidade produtiva e pode ser consorciado com diferentes espécies de gramíneas, especialmente dos gêneros *Brachiaria* e *Cynodon* e *Pennisetum* (Olivo *et al.*, 2017).

Do ponto de vista nutricional, destaca-se pelo elevado valor nutritivo. Os teores de proteína bruta podem variar entre 13 a 25 %, enquanto a digestibilidade *in vitro* na matéria seca situa-se entre 60 a 67 % (Ludwig *et al.*, 2010). outro aspecto importante é sua capacidade de fixação biológica do nitrogênio (N)

mediada por bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, amplamente presentes nos solos tropicais (Ludwig *et al.*, 2010). Na presença destas bactérias, o amendoim forrageiro pode suprir até 90% de suas necessidades nutricionais em N, contribuindo com aproximadamente 100 kg/ha/ano para o sistema (Miranda *et al.*, 2003). Essa contribuição se reflete em maior taxa de acúmulo de forragem, maior consistência na oferta e menor variação nutricional ao longo do ano em pastagens consorciadas (Olivo *et al.*, 2017).

Além dos benefícios produtivos e nutricionais, o amendoim forrageiro também pode contribuir para a mitigação de emissões entéricas de CH₄. As leguminosas, de modo geral, apresentam compostos secundários como taninos, que afetam a fermentação ruminal e reduzem a produção de CH₄ (Boddey *et al.*, 2020).

2.3. Consórcio gramínea-leguminosa

A busca por sistemas forrageiros mais sustentáveis tem se intensificado, especialmente em função do aumento dos preços dos adubos minerais (Carvalho *et al.*, 2019). A fixação biológica de nitrogênio (FBN) realizada por bactérias gram-negativas do gênero *Rhizobium* em associação com leguminosas, representa um dos mecanismos naturais mais eficientes para o desenvolvimento de pastagens (Carvalho *et al.* 2019). Em consórcio com gramíneas, a FBN estabelece uma relação simbiótica que promove a interação positiva entre espécies, a partir do aproveitamento mútuo do N fixado no solo (Mia *et al.*, 2018).

A presença da leguminosa na composição do pasto proporciona melhores índices de desempenho animal, aumenta a oferta de nutrientes para as forrageiras acompanhantes e para o sistema como um todo, além de proporcionar melhoria nos parâmetros ruminais, podendo reduzir a produção de metano entérico (Montenegro *et al.*, 2000). Assim, sua inclusão constitui uma alternativa de menor impacto em termos de investimento, quando comparada ao uso de fertilizantes nitrogenados (Barcelos *et al.*, 2008). O principal objetivo da consorciação entre gramíneas e leguminosas é incrementar a produção animal em relação a pastagens de gramíneas exclusivas, além de reduzir custos de

produção (Olivo *et al.*, 2017). Essa prática associa diferentes espécies na mesma área, aumentando a disponibilidade de nitrogênio no solo e reduzindo a necessidade de adubação mineral (Simioni *et al.*, 2014).

Parte do nitrogênio fixado pelas leguminosas pode ser transferido para gramíneas associadas, de forma direta ou indireta. A transferência direta ocorre por meio de produtos nitrogenados liberados pelos nódulos radiculares ou pelo fluxo de nitrogênio através de hifas micorrízicas que interligam as raízes das duas espécies. Já a transferência indireta se dá pela senescência de raízes e nódulos, bem como pela decomposição dos resíduos da leguminosa (Scottl *et al.*, 2015).

Do ponto de vista ambiental, as leguminosas contribuem para reduzir as emissões de GEE. Isso ocorre tanto pela menor necessidade de fertilizantes nitrogenados, que reduz as emissões de óxido nitroso, quanto pela melhoria no desempenho animal, que pode reduzir a emissão de metano entérico (Macedo *et al.*, 2014). Estudos indicam que pastagens consorciadas de gramíneas com leguminosas apresentam vantagem de aproximadamente 30% quando comparado a sistemas em monocultivo, devido ao aumento da qualidade e produção da forragem e da capacidade de suporte, fatores que influenciam diretamente o desempenho animal (Olivo *et al.*, 2017). A inclusão de leguminosas no sistema favorece o valor nutritivo da forragem e melhora o desempenho da pastagem em períodos críticos, como outono e inverno, no Sul do Brasil, marcados por baixas temperaturas (Fioreli *et al.*, 2018). Outro ponto relevante é o potencial das leguminosas em auxiliar na recuperação de áreas de pastagens degradadas (Aguirre *et al.*, 2014).

Apesar desses benefícios, a adoção de leguminosas em sistemas pecuários ainda é limitada. Relatos de empresas de assistência técnica apontam que seu uso vem sendo reduzido em propriedades rurais (Emater, 2021). No entanto, resultados recentes reforçam a importância de sua integração. De acordo com Antunes *et al.* (2024) a presença do amendoim forrageiro em consórcio com capim-elefante melhora a composição e o valor nutritivo da pastagem, reduz a ocorrência de espécies espontâneas e de material senescente, aumenta a proporção de lâminas foliares e diminui a fração colmo+bainha. Este consórcio resultou em maior acúmulo de forragem

(incremento de até 27,5%) e em elevação do valor nutritivo, com destaque para o aumento da proteína bruta.

Destaca-se que a presença do amendoim forrageiro, além de aumentar o acúmulo de forragem, também contribui para a mitigação dos GEE, ao reduzir necessidade de adubação nitrogenada (Boddey *et al.*, 2020), e consequentemente, as emissões de de óxido nitroso (N_2O), um dos gases de maior potencial de aquecimento global (Rusdy, 2021). Neste sentido, o consórcio entre amendoim forrageiro e capim-elefante apresenta potencial para gerar ganhos produtivos, nutricionais e ambientais, consolidando-se como estratégia promissora para sistemas pecuários mais sustentáveis.

3. Emissões de gases do efeito estufa em consórcios de gramíneas e leguminosas

As condições climáticas do Brasil favorecem a produção contínua de pastagens de alta qualidade ao longo do ano, o que representa uma vantagem competitiva para a pecuária nacional. Por outro lado, o país é um dos maiores emissores de CH_4 de origem pecuária. Em 2023, a fermentação entérica respondeu por 64,2% das emissões do setor agropecuário, liberando cerca de 405 milhões de toneladas de CO_2 equivalente apenas pelo “arroto do boi”. No total, a agropecuária foi responsável por 75,6% das emissões nacionais de CH_4 , sendo a pecuária a principal fonte, com 98% desse valor (SEEG, 2024). Esse cenário frequentemente é utilizado como argumento contrário à exportação de produtos de origem animal brasileiros, sobretudo em mercados internacionais mais exigentes em relação às emissões de gases de efeito estufa.

Diante desse contexto, estratégias de manejo que aliem produtividade e mitigação ambiental tornam-se essenciais. O uso de consórcios entre gramíneas e leguminosas tem ganhado destaque como uma alternativa eficiente e econômica para a reposição de nitrogênio ao solo, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados, uma das principais fontes indiretas de emissões de N_2O . Além disso, esse consórcio pode aumentar a taxa de lotação, prolongar o período de pastejo e melhorar o valor nutritivo da forragem (Aranha *et al.*, 2018). O nitrogênio fixado pelas leguminosas pode ser transferido de forma direta ou

indireta para as gramíneas associadas. A transferência direta ocorre através de exsudatos nitrogenados dos nódulos radiculares ou por meio de fluxos de nitrogênio através de hifas de micorrizas que conectam as raízes das duas espécies. Já a transferência indireta acontece por meio da decomposição de resíduos vegetais, como raízes e nódulos, que liberam nitrogênio (Scotti *et al.*, 2015). A fixação biológica do nitrogênio tem um efeito prolongado, uma vez que sua liberação no solo ocorre de forma gradual e contínua (Lüscher *et al.*, 2014).

A adição de nitrogênio ao solo por meio das leguminosas pode influenciar a capacidade de oxidação do CH₄. Altas concentrações de íons amônio (NH₄⁺) no solo, liberadas durante a decomposição dos resíduos dessas plantas, podem inibir a atividade das bactérias metanotróficas, pois competem com o CH₄ pela enzima mono-oxigenase, responsável por sua oxidação (Duvvuri *et al.*, 2004). Esse processo de decomposição de resíduos das leguminosas no solo resulta em uma liberação mais lenta e contínua do nitrogênio, mantendo níveis elevados de N mineral no solo por mais tempo e, conseqüentemente reduzindo a taxa de oxidação de CH₄ (Gomes, 2006).

As leguminosas produzem resíduos com baixa relação C/N, o que favorece uma maior adição de nitrogênio ao solo. Tanto fontes biológicas quanto sintéticas de nitrogênio podem atuar como potenciais emissores de N₂O. O nitrogênio proveniente da fixação biológica por leguminosas, após ser mineralizado, pode ser submetido aos processos de nitrificação e desnitrificado durante a decomposição dos resíduos vegetais (Angamuthu *et al.*, 2010). No entanto, o cultivo dessas espécies não é considerado uma fonte significativa de N₂O (IPCC, 2006). Segundo Rochette e Janzen (2005), não há evidências que indiquem uma relação direta entre a fixação biológica de nitrogênio e a emissão de N₂O.

O aumento das emissões de N₂O em áreas com leguminosas está mais relacionado à liberação de nitrogênio durante a fase de crescimento da planta e, principalmente, à decomposição de seus resíduos vegetais após a colheita, e não diretamente à fixação biológica de nitrogênio (Rochette e Janzen, 2005). Embora sistemas que incluem leguminosas possam apresentar um aumento nas emissões de N₂O superior às observadas em cultivos exclusivos de gramíneas (Gomes *et al.*, 2009), essas espécies têm grande importância na adição de

nitrogênio ao solo, beneficiando as culturas subsequentes e reduzindo a necessidade de adubação nitrogenada (Amado *et al.*, 2002).

A introdução de leguminosas em sistemas agrícolas também pode intensificar a acidificação do solo, em função da maior remoção de material vegetal alcalino durante a colheita de grãos e do aumento da disponibilidade de nitrogênio (Vieira *et al.*, 2008). Essa diminuição do pH do solo pode afetar a atividade das bactérias metanotróficas, que são sensíveis à acidificação do ambiente (Chan e Parkin, 2001).

Por outro lado, a recuperação direta das pastagens, associadas ao manejo intensivo e ao uso de sistemas integrados, representa uma oportunidade importante para a mitigação dos GEE. A alta produção de forragem das gramíneas tropicais, aliada à eficiência no uso de fertilizantes nitrogenados e ao acúmulo de matéria orgânica em pastagens recuperadas e intensificadas, contribui para a redução das emissões de GEE (Oliveira *et al.*, 2007).

Dessa forma, é essencial avançar em estudos voltados para práticas agrícolas capazes de mitigar os efeitos do aquecimento global, por meio do sequestro de carbono (C), do armazenamento de CH₄ e da redução das emissões de N₂O. A degradação das pastagens, além de reduzir a produtividade e a matéria orgânica do solo, também provoca a emissão de CO₂ afetando negativamente o sequestro de carbono na pastagem.

4. Estoque de carbono

O estoque de carbono no solo é a quantidade de carbono que está armazenada no solo. (Estevam *et al.*, 2024). O estoque total inclui componentes inorgânicos e orgânicos, são eles: materiais, fragmentos finos de resíduos, raízes, fauna do solo, biomassa microbiana, produtos de decomposição microbiana e outros processos bióticos, além de compostos simples, corno açúcares e polissacarídeos. O CO₂ da atmosfera é capturado pelas plantas e transformado em compostos orgânicos por meio da fotossíntese, que é a reação entre o CO₂ e a água (H₂O), produzindo carboidratos (açúcares) e oxigênio (gás que retorna à atmosfera). O gás atmosférico reage com a água, em partes verdes das plantas (folhas, caule etc.) e em presença de luz, e se transformam em

carboidratos, liberando o gás oxigênio para a atmosfera. Após esse processo de remoção do carbono da atmosfera e incorporação pelas plantas verdes em compostos orgânicos, o elemento passa a desempenhar inúmeras funções na formação da biomassa e no metabolismo vegetal, sendo o componente de todos os compostos orgânicos (e.x. carboidratos, proteínas, lipídios, aminoácidos, ácidos nucleicos, ácidos orgânicos, etc) (Assad *et al.*, 2019).

É necessário entender o processo de captura de CO₂ da atmosfera e sua dinâmica do solo. O CO₂ da atmosfera é capturado pelas plantas e transformado em compostos orgânicos por meio da fotossíntese, que é a reação entre o CO₂ e a água (H₂O), produzindo carboidratos (açúcares) e oxigênio (gás que retorna à atmosfera). O gás atmosférico reage com a água, em partes verdes das plantas (folhas, caule etc.) e em presença de luz, e se transformam em carboidratos, liberando o gás oxigênio para a atmosfera. Após esse processo de remoção do carbono da atmosfera e incorporação pelas plantas verdes em compostos orgânicos, o elemento passa a desempenhar inúmeras funções na formação da biomassa e no metabolismo vegetal, sendo o componente de todos os compostos orgânicos (e.x. carboidratos, proteínas, lipídios, aminoácidos, ácidos nucleicos, ácidos orgânicos, etc) (Assad *et al.*, 2019).

Com a morte das plantas, tem-se a formação dos resíduos vegetais que com o passar do tempo, sofrem um processo de fragmentação por macrorganismos e, posteriormente, a decomposição por microrganismos do solo. Dessa forma, se o material não for protegido da ação biológica dos organismos do solo, ou se essa ação não for lenta, a maior parte dele retornará em pouco tempo para a atmosfera na forma de CO₂. Além disso, a ausência de revolvimento por implementos agrícolas, associada ao aumento da atividade biológica, promove a manutenção e formação de agregados do solo. Parte dos resíduos vegetais recém-adicionados ao solo permanecem no interior dos agregados e ficam protegidos da ação decompositora dos organismos do solo. O resultado final é o aumento da quantidade de compostos orgânicos preservados da ação biológica e o aumento da quantidade formada de carbono orgânico total (COT) e matéria orgânica do solo (MOS) (Assad *et al.*, 2019).

5. Emissões de GEE e estratégias de mitigação

As emissões de CO₂ são consideradas de fundamental importância nos estudos dos GEE. Embora muitos métodos estejam disponíveis para monitorar as emissões de CO₂ do solo, a interpretação e o uso de dados podem ser desafiadores, já que as emissões de CO₂ do solo são influenciadas por múltiplos processos. Compreender a dinâmica das emissões de CO₂ solo é, portanto, fundamental para melhorar suas investigações nessa área (Camarda *et al.*, 2019).

De acordo com Li *et al.* (2007) os microrganismos do solo desempenham um papel central na produção e consumo de CO₂, N₂O e CH₄. Esses microrganismos obtêm energia pela quebra de ligações de carbono (C) de compostos orgânicos dissolvidos. Durante esse processo, os elétrons são transferidos do carbono orgânico dissolvido (COD) para os aceptores de elétrons. Durante o processo de transferência de elétrons, o oxigênio ionizado se combina com o C dissociado para formar CO₂ nas células microbianas. Enquanto os microrganismos do solo consomem o O₂ deixado nos poros do solo, a pressão parcial de O₂ do solo cairá rapidamente.

A depleção de O₂ reduz a atividade de grande parte de decompositores, mas estimula a atuação de microrganismos desnitrificadores no solo. Os desnitrificadores são capazes de usar nitrato (NO₃⁻) como um aceptor de elétrons. Ao receber elétrons, o NO₃⁻ se tornará nitrito (NO₂⁻). O nitrito pode ser ainda mais reduzido a óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N₂O) e dinitrogênio (N₂). Durante as próximas etapas de desnitrificação, se o produto intermediário N₂O puder escapar dos microssítios anaeróbios antes de ser ainda mais reduzido, ocorrerá uma emissão líquida de N₂O. Se um solo for colocado sob condições anaeróbicas por um longo tempo (vários dias), os principais oxidantes, como O₂, nitrato, manganês (Mn⁴⁺), ferro (Fe³⁺) e sulfato, serão esgotados pelos decompositores, desnitrificadores. Neste caso, os metanogênicos serão ativados para usar hidrogênio como um aceptor de elétrons que resultará na produção de CH₄ (Li *et al.*, 2007).

Após entender como esses gases se formam, compreender como ocorrem as emissões também é necessário. No solo as emissões de CO₂ estão relacionadas à respiração de raízes, microrganismos e com a decomposição da MO. As emissões de CO₂ são decorrentes principalmente de alterações nas concentrações das diferentes frações da MO do solo, a partir de qualidade, adição ou remoção. (Abreu *et al.*, 2024)

A emissão do CH₄ ocorre a partir da ação de microrganismos denominados metanogênicos, que em condição de anaerobiose, utilizam como substratos o acetato. Sua oxidação pode ser realizada por microrganismos denominados metanotróficos que o utilizam como única fonte de alimento em condições aeróbias (Abreu *et al.*, 2024)

O óxido nitroso (N₂O) é uma das formas gasosas de Nitrogênio (N) produzido durante o processo de nitrificação, também produzido durante o processo de desnitrificação a partir de microrganismos desnitrificantes através da redutase do óxido nítrico, que é comumente associado como principal processo de formação do N₂O (Abreu *et al.*, 2024).

De acordo com Laubach (2023) pastagens são uma fonte importante de emissões de N₂O. Nesse estudo foi avaliado se as emissões líquidas de N₂O de pastagens irrigadas pastadas por vacas leiteiras podem ser reduzidas plantando espécies mais diversas, em comparação com pastagens convencionais de azevém-trevo, e se há benefícios para redução de gases de efeito estufa por ganhos líquidos de C no ecossistema, ou compensações por perdas líquidas de C. Os fluxos de CO₂ e N₂O foram medidos por covariância de vórtice, perto do limite de pastagens mistas de cinco espécies adjacentes (MIX) e pastagens de azevém-trevo branco (RyWC). As emissões anuais de N₂O da pastagem MIX foram de 0,14 g N m⁻² ano⁻¹ (média de dois anos), em comparação com 0,23 g N m⁻² ano⁻¹ da pastagem RyWC. As emissões de N₂O foram responsáveis por 0,34% e 0,61% das entradas de nitrogênio nas pastagens MIX e RyWC, respectivamente. Combinando todos os ganhos e perdas de C, ambas as pastagens registraram ganhos líquidos de C do ecossistema no primeiro ano, de 44 e 282 g C m⁻² para MIX e RyWC, respectivamente. Assim, em ambos os

anos, o balanço líquido de C deu à pastagem RyWC uma vantagem considerável sobre a pastagem MIX no balanço líquido de gases de efeito estufa.

De acordo com Abd-Alla (2023) para mitigar as mudanças climáticas, é necessário encontrar soluções para reduzir o uso de fertilizantes de nitrogênio. De acordo com o autor, a utilização da simbiose *Rhizobium* -leguminosa pode trazer bons resultados. Ao aproveitar essa simbiose natural, os agricultores podem reduzir sua dependência de fertilizantes de nitrogênio sintéticos. Para melhorar a relação simbiótica entre *Rhizobium* e leguminosas e reduzir a dependência de fertilizantes de nitrogênio para mitigação das mudanças climáticas, a seleção de linhagens rizobiais pode melhorar ainda mais os resultados.

A Recuperação e manejo de pastagens também se mostra eficaz em mitigar GEE, manutenção da fertilidade do solo por meio de calagem e adubação, ajuste da taxa de lotação, escolha adequada da espécie forrageira, dentre outras, são práticas essenciais para a manutenção de cobertura vegetal contínua e recuperação de pastagens degradadas, contribuindo para aumentar a quantidade de C armazenada no solo (Meo Filho *et al.*, 2022).

As leguminosas também têm potencial para aumentar o teor de nitrogênio no sistema solo/planta em ambiente consorciado com pastagem, fornecendo uma importante fonte de nitrogênio para as gramíneas e favorecendo o aumento da produtividade vegetal e animal, de forma a minimizar a emissão de CH₄ e N₂O, pois há redução de fertilizantes químicos nitrogenados (Ku-Vera *et al.*, 2020).

Tendo em vista o potencial destruidor que os GEE possuem, em 2009, o Brasil se comprometeu a reduzir as emissões desses gases. Desde então, foi instituída a Política Nacional sobre Mudanças Climáticas. Em 2010, foi elaborado o Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para a consolidação de uma Economia de Baixo Carbono na Agricultura (Plano ABC). As ações do Plano ABC buscaram recuperar pastagens degradadas, ampliar a adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, sistemas agroflorestais e sistema plantio direto, disseminar a fixação biológica de nitrogênio, reflorestar florestas e tratar dejetos animais (Telles *et al.*, 2021). O aumento no sequestro de carbono (C) é importante para melhorar a eficiência e

sustentabilidade dos sistemas pastoris de produção pecuária e é um ponto chave do plano ABC.

6. Referências bibliográficas

- ABD-ALLA, Mohamed *et al.* Enhancing Rhizobium–Legume Symbiosis and Reducing Nitrogen Fertilizer Use Are Potential Options for Mitigating Climate Change. **Agriculture**, v. 13, n. 11, p. 2092, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13112092>.
- ABIEC. Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne. **Perfil da Pecuária no Brasil**- Relatório Anual 2020. https://abiec.com.br/wp-content/uploads/SUM%C3%81RIO-BEEF-REPORT-2020_NET-4.pdf. Acessado: 04 de outubro de 2025.
- ABREU, Natan *et al.* Mudanças de uso da terra e emissão de gases de efeito estufa: uma explanação sobre os principais *drivers* de emissão. **Ciência Animal Brasileira**, v. 25, p. 77646E, 2024.
- AGUIRRE, Priscila *et al.* Produtividade de pastagens de Coastcross-1 em consórcio com diferentes leguminosas de ciclo hibernal. **Ciência Rural**, v. 44, p. 2265-2272, 2014. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140156>.
- AMADO, T.J.C.; Mielniczuk, J.; Aita, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.1, p.241-248, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000100025>.
- ANGAMUTHU, Raja *et al.* Electrocatalytic CO₂ conversion to oxalate by a copper complex. **Science**, v. 327, n. 5963, p. 313-315, 2010. <https://doi.org/10.1126/science.1177981>
- ANTUNES, Monique *et al.* Sward characteristics, herbage accumulation and nutritional value of elephantgrass based mixed with or without pinto peanut. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 96(2), e20231145, 2024. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202420231145>.
- ARANHA, A. S. *et al.* Performance, carcass and meat characteristics of two cattle categories finished on pasture during the dry season with supplementation in different forage allowance. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 70, n. 2, p. 517-524, 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-9576>.
- ASSAD, Eduardo *et al.* Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. 2019. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1112696>. Acessado: 04 de outubro de 2025.

- BARCELLOS, Alexandre *et al.* Sustentabilidade da produção animal baseada em pastagens consorciadas e no emprego de leguminosas exclusivas, na forma de banco de proteína, nos trópicos brasileiros. **Revista Brasileira Zootecnia**, v.37, supl. esp., p.51-67, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008001300008>.
- BARRO, Raquel *et al.* Forage yield and nitrogen nutrition dynamics of warm-season native forage genotypes under two shading levels and in full sunlight. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, n. 7, p. 1589-1597, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982012000700006>.
- BODDEY, Robert *et al.* Forage legumes in grass pastures in tropical Brazil and likely impacts on greenhouse gas emissions: A review. **Grass and forage Science**, v. 75, n. 4, p. 357-371, 2020. <https://doi.org/10.1111/gfs.12498>.
- BRATZ, Vinicius *et al.* Response of elephant grass to grazing under an organic production system. **Revista Ciência Agronômica**, v. 50, n. 1, p. 159-168, 2019. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20190019>.
- CAMARDA, Marco *et al.* The monitoring of natural soil CO₂ emissions: Issues and perspectives. **Earth-Science Reviews**, v. 198, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102928>.
- CARVALHO Luciani *et al.* Nodulation and biological nitrogen fixation (BNF) in forage peanut (*Arachis pintoi*) cv. Belmonte subjected to grazing regimes. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 278: 96-106. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102928>.
- CHAN, Alvarus; PARKIN, Timothy. Methane oxidation and production activity in soils from natural and agricultural ecosystems. **Journal of Environmental Quality**, v. 30, n. 6, p. 1896-1903, 2001. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.1896>.
- DAHER, Rogério *et al.* Variação sazonal na produção de forragem de clones intra e interespecíficos de capim elefante. **Revista Agrarian**, v. 10, n. 38, p. 294-303, 2017. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1099840>. Acessado: 04 de outubro de 2025.
- EMATER. **Relatório Socioeconômico da Cadeia Produtiva do Leite no Rio Grande do Sul: 2021**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2021. <https://www.sindilat.com.br/site/wp-content/uploads/2021/09/RELATORIO-LEITE-2021.pdf>. Acessado: 04 de outubro de 2025.
- ESTEVAM, Camila; De Moraes Pavão, Eduardo. Carbono no solo essencial no combate às mudanças climáticas. **AgroANALYSIS**, v. 44, n. 9, p. 25-27, 2024.
- FERRAZZA, Jussara *et al.* Dinâmica de produção de forragem de gramíneas anuais de inverno em diferentes épocas de semeadura. **Ciência Rural**, v. 43(7), p. 1174-1181, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013005000086>.

- IORELI, A. B. *et al.* Valor nutritivo de gramíneas do gênero *Cynodon* consorciadas com amendoim forrageiro. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 70, p. 1970-1978, 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-10048>.
- FONTANELI, Renato *et al.* Gramíneas Forrageiras perenes de verão. In: FONTANELI, R. S. *et al.* **Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região sul-brasileira**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2012b. cap. 8. p. 265-269.
- GOMES, Juliana. Emissão de gases do efeito estufa e mitigação do potencial de aquecimento global por sistemas conservacionistas de manejo do solo. 2006. 126 f. **Tese (Doutorado)** - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- GOMES, Juliana. *et al.* Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crop-based crop rotations under subtropical climate. **Soil & Tillage Research, Amsterdam**, v. 106, n. 1, p. 36-44, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.10.001>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Refinement to the 2006 **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2019**. Acessado: 23 de setembro de 2025. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
- KU-VERA, Juan *et al.* Role of secondary plant metabolites on enteric methane mitigation in ruminants. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 7, p. 584, 2020. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00584>
- LI, Changsheng. Quantifying greenhouse gas emissions from soils: Scientific basis and modeling approach. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 53 n. 4, p. 344–352, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00133.x>.
- LUDWIG, Rodrigo *et al.* Produção e qualidade do *Arachis pintoi*. **Enciclopédia Biosfera**, v. 6, n. 11, p. 1-14. 2010.
- LÜSCHER, A. *et al.* Potential of legume-based grassland–livestock systems in Europe: a review. **Grass and Forage Science**, v. 69, n. 2, p. 206-228, 2014. <https://doi.org/10.1111/gfs.12124>.
- MACEDO, Manuel *et al.* Degradação de pastagens, alternativas de recuperação e renovação, e formas de mitigação. In: **Anais de Congresso**, Ribeirão Preto, SP, Embrapa Gado de Corte, p.158-181, 2014.
- DUVVURI, Sridhar. Majumdar S. Mitra, A. Role of metabolism in ocular drug delivery. **Current drug metabolism**, v. 5, n. 6, p. 507-515, 2004. <https://doi.org/10.2174/1389200043335342>.
- MEO FILHO, Paulo *et al.* Sistemas intensificados de pastagem podem reduzir as emissões de metano entérico de bovinos de corte no Bioma Mata Atlântica?

- Agronomy**, n. 12, p. 2738, 2022.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12112738>.
- MIA, Shamim *et al.* Enhanced biological nitrogen fixation and competitive advantage of legumes in mixed pastures diminish with biochar aging. **Plant Soil**, v. 424, p. 639-651, 2018.<https://doi.org/10.1007/s11104-018-3562-4>.
- MINASNY, Budiman *et al.* Soil carbon 4 per mille. **Geoderma**, v. 292, p. 59-86, 2017.<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>.
- MIRANDA, Cesar; Vieira, A.; Cadish, G. Determinação da fixação biológica de nitrogênio no amendoim forrageiro (*Arachis spp.*) por intermédio da abundância natural de ^{15}N . **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, n. 6, p. 1859-1865, nov./dez. 2003.<https://doi.org/10.1590/S1516-35982003000800008>.
- MONTENEGRO, Abarca. Fijación de carbono, emisión de metano y óxido nitroso en sistemas de producción bovina en Costa Rica. In: Intensificación de la ganadería en Centroamérica beneficios económicos y ambientales. Costa Rica: **CATIE/FAO/SIDE**. Editado por Nuestra Terra, 334 p., 2000.
- NASCIMENTO, Inaldete. O cultivo do amendoim forrageiro. **Current Agricultural Science and Technology**, v. 12, n. 4, 2006.
<https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/CAST/article/view/4687?>
Acessado: 04 de outubro de 2025.
- SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa). Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil, 2024. <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>.
Acessado: 23 de setembro de 2025.
- OLIVEIRA, Ricardo *et al.* Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 2, p. 71-76, 2007.<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=253020281002>.
- OLIVO, Clair *et al.* Forage systems mixed with forage legumes grazed by lactating cows. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 39, n. 1, p. 19-26, 2017. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.V39I1.32300>.
- PEREIRA, José *et al.* Production of beef cattle grazing on *Brachiaria brizantha* (Marandu grass)-*Arachis pintoi* (forage peanut cv. Belomonte) mixtures exceeded that on grass monocultures fertilized with 120 kg N/ha. **Grass and Forage Science**, v. 75, n. 1, p. 28-36, 2020.<https://doi.org/10.1111/gfs.12463>.
- ROCHETTE, Philippe; JANZEN, Henry H. Towards a revised coefficient for estimating N_2O emissions from legumes. **Nutrient cycling in agroecosystems**, Heidelberg, v.73, n.2- 3, p.171-179, 2005.

- RUSDY, Muhammad. Grass-legume intercropping for sustainability animal production in the tropics. **CAB Reviews**, v.16, n.1, p.1-9, 2021. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR202116021>.
- SCOTTI, Ricardo *et al.* Organic amendments as sustainable tool to recovery fertility in intensive agricultural systems. **Journal of soil science and plant nutrition**, v.15, n.2, p.333-352, 2015. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162015005000031>.
- SEIBT, Daiane. Forage mass and nutritional value of elephant grass intercropped with forage legumes. **Revista Ceres**, v. 68, n. 5, p. 429-440, 2021. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202168050008>.
- SILVEIRA, Robson *et al.* Atributos químicos de um Neossolo Flúvico cultivado com capim elefante (*Pennisetum purpureum*) no município de Bela Cruz-CE. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 14, n. 4, p. 325-330, 2019.
- SIMIONI, Tiago *et al.* Senescência, remoção, translocação de nutrientes e valor nutritivo em gramíneas tropicais. **PUBVET**, v. 8, n. 13, Ed. 262, Art. 1743, Julho, 2014.
- TELLES, Tiago *et al.* **Desenvolvimento da agricultura de baixo carbono no Brasil**. Texto para Discussão 2638. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, mar. 2021. <https://repositorio.ipea.gov.br/entities/publication/9a41a687-29d9-4764-aa34-b31ed89feb3d>. Acessado: 04 de outubro de 2025.
- TERRA, Ana; Florentino, L. A.; Rezende, A. V.; Silva, N. C. D. E. Leguminosas forrageiras na recuperação de pastagens no Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 2, p. 305–313, 2019. <https://doi.org/10.19084/rca.16016>.
- VIEIRA, Frederico *et al.* Long-term acidification of a Brazilian Acrisol as affected by no till cropping systems and nitrogen fertiliser. **Australian Journal of Soil Research**, v. 46, n. 1, p. 17-26, 2008, <https://doi.org/10.1071/SR07088>.

Autores

Monique Evelyn de Lima Pacheco, Francine Basso Facco, Paola de Oliveira Selau, Kamilly Pech Oliveira, Amanda Zucheto, Caroline Frozza, Thainara Fagundes, Julio Viégas

Departamento Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

CAPÍTULO 12

Suplementação energética em pastagens hibernais e seus efeitos no desempenho e na eficiência produtiva de bezerras de corte

Érica Dambros de Moura, Fabielly de Jesus Depra dos Santos, Eduarda Proença de Oliveira, Bruna Fernandes Machado, Dinah Pereira Abbott, Marta Gomes da Rocha, Luciana Pötter

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-39-8.c12>

Resumo

Um dos fatores estratégicos para a intensificação dos sistemas de cria é a idade ao primeiro acasalamento, sendo este o ponto de maior impacto na eficiência produtiva. O uso de pastagens cultivadas de inverno, aliado à suplementação energética, configura-se como uma alternativa eficiente para assegurar o desenvolvimento corporal adequado, possibilitando que as fêmeas atinjam o peso ideal entre 12 e 14 meses de idade. Ao longo de mais de 20 anos de pesquisas desenvolvidas pelo Laboratório de Pastos & Suplementos, foram avaliados diversos grupos de suplementos como grãos, subprodutos e rações comerciais, em diferentes níveis de fornecimento. O objetivo deste capítulo é apresentar informações sobre o desempenho de novilhas durante a fase de recria, com ou sem adição de suplemento. O uso de suplementos para bezerras de corte durante a fase de recria apresenta diversos benefícios, como a melhora no ganho de peso individual dos animais, o aumento na taxa de lotação e, consequentemente, o maior aproveitamento das áreas de pastagem. Com o uso de suplementação energética foram observados valores de ganho médio diário (GMD) superiores em 0,200 kg/dia, taxa de lotação superior em 232,13 kg/ha de peso corporal (PC), em comparação às bezerras exclusivamente a pasto. Nas avaliações experimentais, observou-se uma diferença de 0,68 pontos no escore de condição corporal. O GPA obtido com o uso de suplementação foi de 606,45 kg de PV/ha, representando um aumento de 33,5% em relação ao tratamento sem suplementação. O uso do suplemento proporcionou incrementos no escore de condição corporal, ganho de peso diário, ganho por área e taxa de lotação.

Palavras chaves: acasalamento, bezerras de corte, forrageiras de inverno, suplementos.

1. Introdução

A bovinocultura de corte brasileira é uma atividade de extrema importância para a economia do país. Segundo o Nespro (2024), o Brasil exportou, no ano de 2024, aproximadamente 25% da produção total de carne bovina, o que representa 11,6 bilhões de dólares. Essa alta demanda, tanto interna quanto externa, exige que os processos dentro da cadeia produtiva da bovinocultura sejam cada vez mais eficientes.

Os rebanhos de cria constituem um pilar fundamental da atividade, pelo seu papel multiplicador do rebanho, produzindo bezerros e garantindo a continuidade da cadeia produtiva. Para que altos índices produtivos sejam alcançados nesses rebanhos, é imprescindível atender às demandas nutricionais, sanitárias e reprodutivas, pois falhas em qualquer um desses elos comprometem a eficiência de todo o sistema.

Um dos fatores estratégicos para a intensificação dos sistemas de cria é a idade ao primeiro acasalamento, sendo este o ponto de maior impacto na eficiência produtiva. Reduzir essa idade, possibilitando que as fêmeas concebam aos 14 meses de idade, exige dos sistemas de produção um aporte nutricional eficiente, principalmente durante a fase de recria. Para que o início da atividade reprodutiva ocorra com sucesso dentro da idade alvo de 12 a 14 meses, é necessário que as fêmeas atinjam cerca de 65% do peso corporal adulto, além de apresentarem adequada produção hormonal e atividade ovariana cíclica.

O desenvolvimento corporal das novilhas está diretamente relacionado ao peso, à desmama e ao ganho de peso na fase de recria. Por isso, as estratégias alimentares devem ser cuidadosamente planejadas, a fim de evitar oscilações ou perdas de peso durante essa fase. A pastagem natural no Rio Grande do Sul, muitas vezes, constitui a principal fonte alimentar das bezerras em seu primeiro inverno, entretanto, essa condição forrageira, isoladamente, não é suficiente para promover crescimento satisfatório nem para garantir o alcance do peso alvo para acasalamento aos 14 meses de idade.

O uso de pastagens cultivadas de inverno, aliado à suplementação energética, configura-se como uma alternativa eficiente para assegurar o desenvolvimento corporal adequado, possibilitando que as fêmeas atinjam o

peso ideal entre 12 e 14 meses de idade. O fornecimento estratégico da suplementação energética, associado ao uso de pastagens de inverno, como o Azevém, e a interação entre o consumo de pasto e o consumo de suplemento determinam a eficiência desse manejo nutricional. Diante da ampla expansão da agricultura, há grande disponibilidade de grãos de cereais e subprodutos oriundos dessas cadeias produtivas, que podem ser utilizados na suplementação animal.

Ao longo de mais de 20 anos de pesquisas desenvolvidas pelo Laboratório de Pastos & Suplementos, foram avaliados diversos grupos de suplementos como grãos, subprodutos e rações comerciais, em diferentes níveis de fornecimento. O objetivo deste capítulo é apresentar informações sobre o desempenho de novilhas durante a fase de recria com adição de suplemento.

2. Suplementação de bezerras de corte em pastagem cultivada de inverno

O uso de suplementação para bezerras de corte durante a fase de recria apresenta diversos benefícios, como a melhora no ganho de peso individual dos animais, o aumento na taxa de lotação e, conseqüentemente, o maior aproveitamento das áreas de pastagem. Além disso, a suplementação pode ser uma alternativa para minimizar os riscos de oscilações de peso ocasionadas pela variabilidade na disponibilidade de forragem e por condições climáticas desfavoráveis.

Em situações em que os animais são mantidos exclusivamente em pastejo, esses fatores podem se tornar limitantes, resultando em prejuízos produtivos e atrasos no acasalamento das fêmeas (Rocha e Lobato, 2002). Quando a suplementação é realizada de forma a assegurar o incremento no consumo de matéria seca, a dieta passa a apresentar melhor qualidade, promovendo o desenvolvimento satisfatório dos animais e o conseqüente aumento no ganho de peso (Roso, 2000).

Segundo o NRC (1996), os suplementos energéticos são classificados e agrupados como ricos em amido, açúcares ou fibra digestível (Figura 1).

Os Subprodutos, além de serem uma fonte alimentar de menor custo, têm papel importante em pastagens de inverno, pela sua rápida taxa de degradação

da pastagem e a relativa queda de pH ruminal (Horn *et al.*, 1995). O alto teor de amido, quando utilizado em grande quantidade, pode diminuir a digestibilidade da forragem sendo um limitador do consumo de pasto (Mieres, 1997).

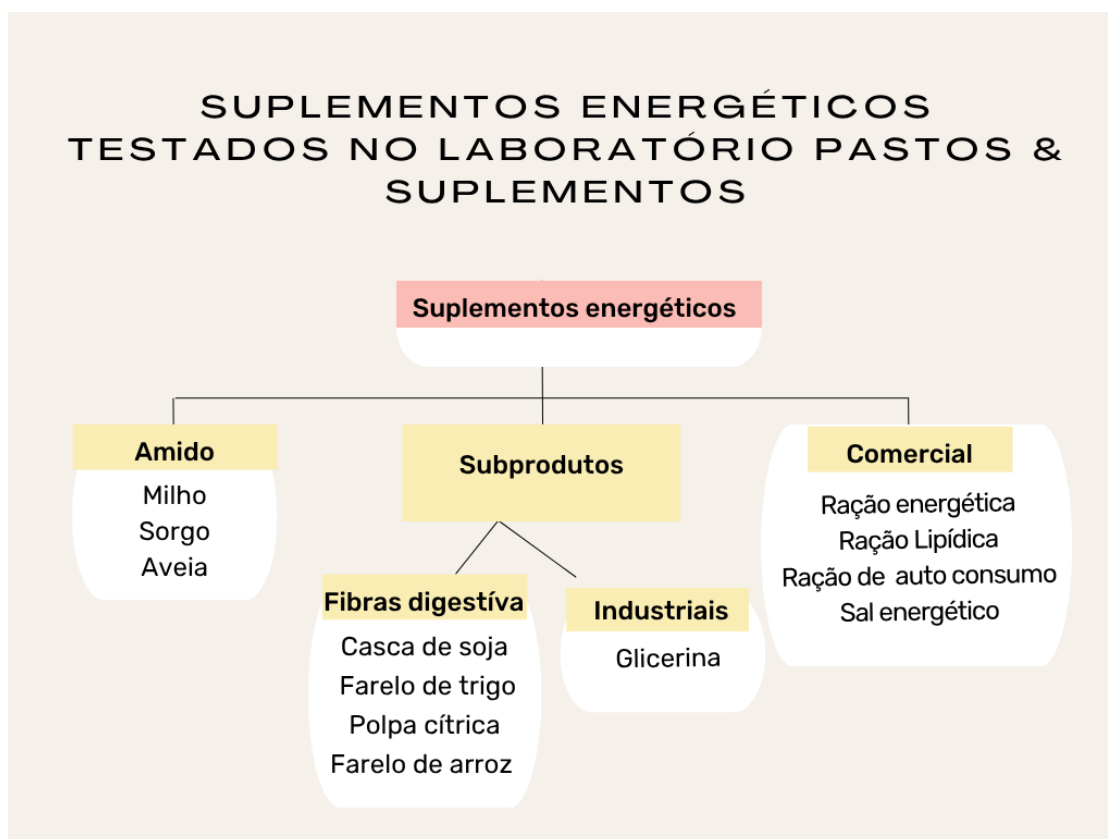


Figura 1. Mapa mental ilustrando a classificação dos suplementos energéticos testados no Laboratório Pastos & Suplementos.

A suplementação energética melhora a utilização do nitrogênio presente nas pastagens hibernais, pois fornece aporte adicional de aminoácidos, favorecendo a síntese de proteína microbiana e reduzindo as perdas de nitrogênio.

A inter-relação entre o pasto e o suplemento modula o consumo voluntário de forragem e, em resposta, o uso do suplemento pode gerar um efeito substitutivo, caracterizado pela redução na ingestão de pasto em função do consumo de suplemento. Mesmo em situações em que ocorre esse efeito de substituição, a suplementação energética promove incremento na taxa de ganho de peso (Simione e Bereta, 2004).

Além disso, segundo Pötter *et al.* (2010b), a substituição de 0,6 kg de pasto consumido por kg de suplemento fornecido é capaz de gerar aumento na taxa de lotação de aproximadamente 25% em relação aos piquetes onde os animais permanecem exclusivamente em pastagem.

TRABALHOS	ANO DE CONDUÇÃO	TIPO DE SUPLEMENTO
Rocha <i>et al.</i> , 2003	1998	AMIDO
Frizzo <i>et al.</i> , 2001	1999	SUBPRODUTO
Santos <i>et al.</i> , 2003	2001	AMIDO E SUBPRODUTO
Pilau <i>et al.</i> , 2003a	2003	AMIDO
Freitas <i>et al.</i> , 2004	2003	SUBPRODUTO
Pilau <i>et al.</i> , 2003b	2004	SUBPRODUTO
Macari <i>et al.</i> , 2005	2004	RAÇÃO ENERGÉTICA
Roso <i>et al.</i> , 2007	2005	RAÇÃO ENERGÉTICA
Rosa <i>et al.</i> , 2010	2007	RAÇÃO ENERGÉTICA
Roso <i>et al.</i> , 2011	2008	RAÇÃO LIPÍDICA
Rosa <i>et al.</i> , 2011	2009	RAÇÃO ENERGÉTICA
Oliveira <i>et al.</i> , 2012	2010	AMIDO E SUBPRODUTO
Fonseca Neto <i>et al.</i> , 2013	2011	SUBPRODUTO
Alves <i>et al.</i> , 2014	2012	AMIDO AMIDO E SUBPRODUTO
Gai <i>et al.</i> , 2015	2013	INDUSTRIAL
Amaral Neto <i>et al.</i> , 2016	2014	SUBPRODUTO
Vicente <i>et al.</i> , 2022	2015	AMIDO
Amaral Neto <i>et al.</i> , 2020	2016	SUBPRODUTO
Rosa <i>et al.</i> , 2022	2018	MINERAL
Rosa <i>et al.</i> , 2022	2019	RAÇÃO DE AUTOCONSUMO
Domingues <i>et al.</i> , 2022	2020	SAL ENERGÉTICO

Figura 2. Trabalhos realizados no Laboratório Pastos & Suplementos avaliando o uso de suplementação energética em pastagens hibernais.

De acordo com Amaral (2020), o fornecimento de 0,5% de suplemento energético, em sistema de pastejo rotativo de azevém, promoveu efeitos substitutivo e aditivo de forma combinada, resultando em aumento da taxa de lotação, do ganho médio diário e do ganho de peso por hectare.

2.1. Ganho médio diário

Alcançar o objetivo de acasalar as novilhas aos 12–14 meses de idade está diretamente relacionado ao peso, à desmama e ao ganho médio diário desses animais durante o primeiro inverno. O ganho médio diário sob pastejo de forrageiras hibernais está intimamente associado ao manejo do pasto e ao estágio fenológico das plantas. O consumo voluntário de forragem, por sua vez, também depende da estrutura do dossel e da qualidade da forragem disponível.

Os bovinos são animais selecionadores e, quando possível, optam por plantas de fácil apreensão e ruptura, preferindo aquelas mais altas, com maior proporção de folhas em relação a colmos e com maiores teores de nitrogênio (Carvalho *et al.*, 2001).

Pötter (2008), em uma metanálise de estudos conduzidos pelo Laboratório Pastos & Suplementos entre 1999 e 2007, identificou que as bezerras suplementadas consumiram maior proporção de folhas e apresentaram comportamento mais seletivo em comparação às não suplementadas. A massa média de forragem observada durante esses estudos foi de 1.565,2 kg de MS/ha, o que permitiu aos animais colher uma forragem de boa qualidade e em quantidade satisfatória.

Em 21 experimentos realizados pelo laboratório, observou-se que os animais que receberam suplementação energética apresentaram ganho médio diário (GMD) superior em 0,200 kg/dia em comparação aos animais não suplementados.

Esse acréscimo no GMD pode ser explicado pelo incremento energético do suplemento e pelo aumento na ingestão de matéria seca. O efeito substitutivo permitiu que as bezerras colhessem uma forragem com menor teor de FDN.

O Avanço no ciclo fenológico das forrageiras, modificam as características estruturais do pasto, que por sua vez, alteram a qualidade da forragem consumida. Por isso, o ganho médio diário sofre oscilações e pode ser menor no final do ciclo da pastagem.

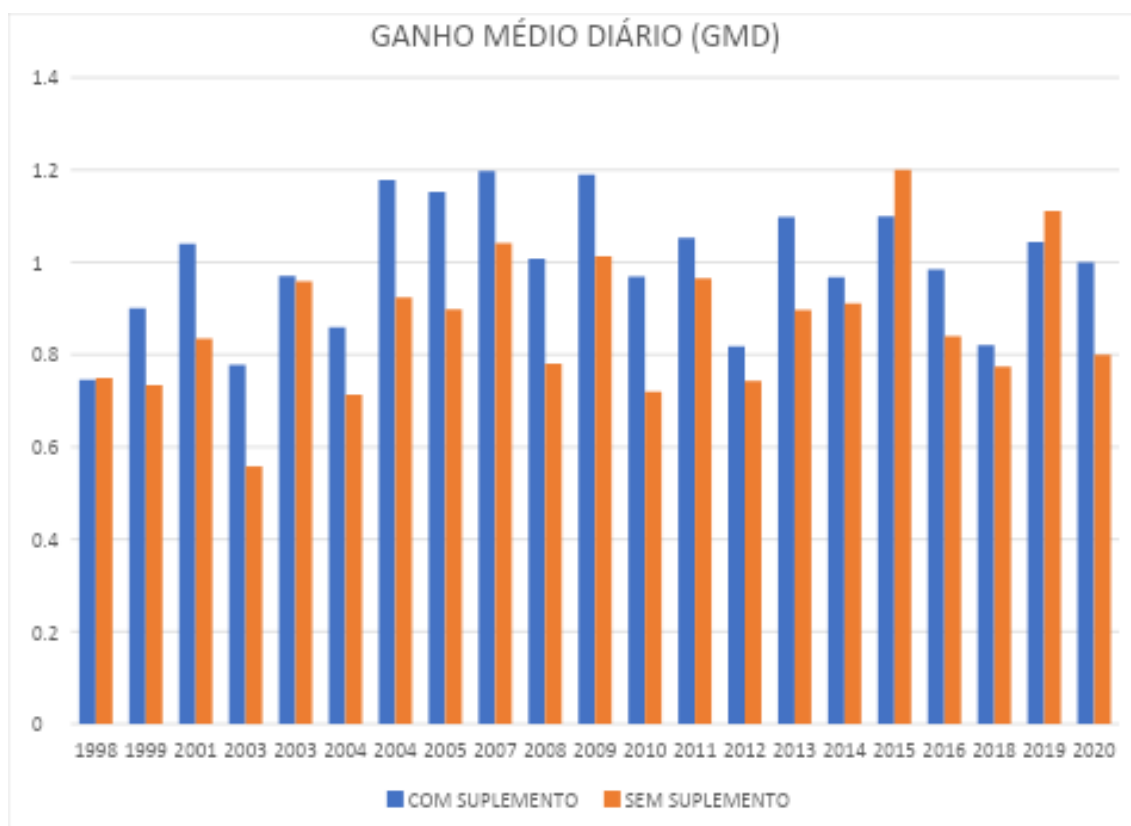


Figura 3. Ganho médio diário (GMD) obtido em 21 experimentos avaliando o uso de suplementação energética em pastagens hibernais.

2.2. Taxa de lotação

A taxa de lotação é variável ao longo do período de utilização da pastagem, devendo acompanhar o ritmo de crescimento do pasto para garantir aos animais uma oferta de forragem adequada. O uso de suplemento e o possível efeito substitutivo no consumo de forragem permitem o acondicionamento de um maior número de animais na mesma área, possibilitando que mais fêmeas atinjam o peso-alvo no início da estação de monta.

Durante os anos avaliados, a taxa de lotação observada foi, em média, 20% superior nos sistemas com uso de suplemento em comparação àqueles sem suplementação. O fornecimento de suplemento é capaz de manter a taxa de lotação mesmo em períodos de oscilações climáticas, assegurando a continuidade da produção e a manutenção dos ganhos de peso. Assim, mesmo

em momentos de menor crescimento das pastagens, a suplementação contribui para a sustentação da taxa de lotação (Fernández e Mieres, 2005).

A taxa média de lotação observada com o uso de suplemento foi de 1.228,94 kg de peso vivo (PV) por hectare, representando um acréscimo de 232,13 kg/ha de PV em relação ao sistema sem suplementação. Domingues (2022) também observou aumento na taxa de lotação no último período de pastejo, sendo 39,3% superior no tratamento com suplementação autolimitante em comparação ao tratamento sem suplemento. Esse incremento foi atribuído ao efeito substitutivo da pastagem, em que o suplemento forneceu o aporte necessário para a manutenção dos ganhos individuais, além de aumentar a capacidade de suporte do pasto.

Tabela 1. Taxa de lotação obtida em 21 experimentos avaliando o uso de suplementação energética em pastagens hibernais.

TRABALHOS	TAXA DE LOTAÇÃO	
	SUPLEMENTO	SEM SUPLEMENTO
Rocha <i>et al.</i> , 2003	1360,12	1125,32
Frizzo <i>et al.</i> , 2001	1546,93	1065,1
Santos <i>et al.</i> , 2003	950,62	877,05
Pilau <i>et al.</i> , 2003a	1119,03	951,2
Freitas <i>et al.</i> , 2004	2104,31	1822,38
Pilau <i>et al.</i> , 2003b	996,53	836,28
Macari <i>et al.</i> , 2005	997,51	881,31
Roso <i>et al.</i> , 2007	996,56	851,13
Rosa <i>et al.</i> , 2010	1522,67	1256,03
Roso <i>et al.</i> , 2011	1075,66	1097,85
Rosa <i>et al.</i> , 2011	1308,96	1250,16
Oliveira <i>et al.</i> , 2012	1201,49	874,11
Fonseca Neto <i>et al.</i> , 2013	1009,33	981,81
Alves <i>et al.</i> , 2014	1308,9	1079,44
Gai <i>et al.</i> , 2015	1349,48	1036,53
Amaral Neto <i>et al.</i> , 2016	1688,45	1362,17
Amaral Neto <i>et al.</i> , 2020	1657,6	1084,24
Vicente <i>et al.</i> , 2022	1526	1167,85
Rosa <i>et al.</i> , 2022	1228,94	1226,5
Rosa <i>et al.</i> , 2022	1119,2	1023,6
Domingues <i>et al.</i> , 2022	1027,03	905,28

2.3. Ganho por área

O ganho de peso por área (GPA) é a variável que determina a receita bruta de um sistema produtivo, independentemente do objetivo da recria. Essa variável demonstra que o uso de suplemento aumenta a eficiência de utilização da pastagem, permitindo a necessidade de menor área para pastejo e, ainda assim, promovendo incremento no ganho médio diário (GMD) dos animais. Um maior GPA, em sistemas que visam à redução da idade ao primeiro acasalamento, pode indicar um maior número de bezerras atingindo o peso-alvo ao final do primeiro inverno (Pötter, 2008).

Tabela 2. Ganho por área em 21 experimentos avaliando o uso de suplementação energética em pastagens hibernais.

TRABALHOS	GANHO POR ÁREA	
	SUPLEMENTO	SEM SUPLEMENTO
Rocha <i>et al.</i> , 2003	603,05	526,17
Frizzo <i>et al.</i> , 2001	669,73	433,30
Santos <i>et al.</i> , 2003	605,40	459,00
Pilau <i>et al.</i> , 2003a	524,83	349,50
Freitas <i>et al.</i> , 2004	1023,78	822,45
Pilau <i>et al.</i> , 2003b	529,48	402,83
Macari <i>et al.</i> , 2005	607,50	442,10
Roso <i>et al.</i> , 2007	434,17	298,30
Rosa <i>et al.</i> , 2010	569,34	455,83
Roso <i>et al.</i> , 2011	566,04	424,23
Rosa <i>et al.</i> , 2011	734,60	710,00
Oliveira <i>et al.</i> , 2012	670,45	452,15
Fonseca Neto <i>et al.</i> , 2013	651,73	566,87
Alves <i>et al.</i> , 2014	469,10	398,33
Gai <i>et al.</i> , 2015	818,32	523,44
Amaral Neto <i>et al.</i> , 2016	871,58	690,23
Vicente <i>et al.</i> , 2022	727,82	582,90
Amaral Neto <i>et al.</i> , 2020	646,82	497,17
Rosa <i>et al.</i> , 2022	418,69	381,76
Domingues <i>et al.</i> , 2022	532,00	389,20

O GPA obtido com o uso de suplementação foi de 606,45 kg de PV/ha, representando um aumento de 33,5% em relação ao tratamento sem

suplementação. Esse resultado é reflexo do maior ganho de peso individual dos animais e da maior taxa de lotação observada.

2.4. Escore de condição corporal

As avaliações de escore de condição corporal configuram-se por um método simples, barato e fácil de ser implementado. Para avaliar a condição corporal dos animais e suas flutuações, o ECC tem uma maior eficácia do que o peso vivo.

O maior escore de condição corporal (ECC) observado nos animais suplementados pode ser explicado pela diferença na composição do ganho de peso, uma vez que animais que recebem suplemento apresentam maior deposição de gordura. O escore mínimo recomendado para que as fêmeas entrem na puberdade e estejam aptas ao acasalamento é de 3 pontos, em uma escala de 1 a 5 (Rocha e Lobato, 2002b). Quando avaliadas as taxas de prenhez, durante o período de acasalamento, verificasse que a condição corporal é uma variável chave para o sucesso da reprodução (Lemenager *et al.*, 1980).

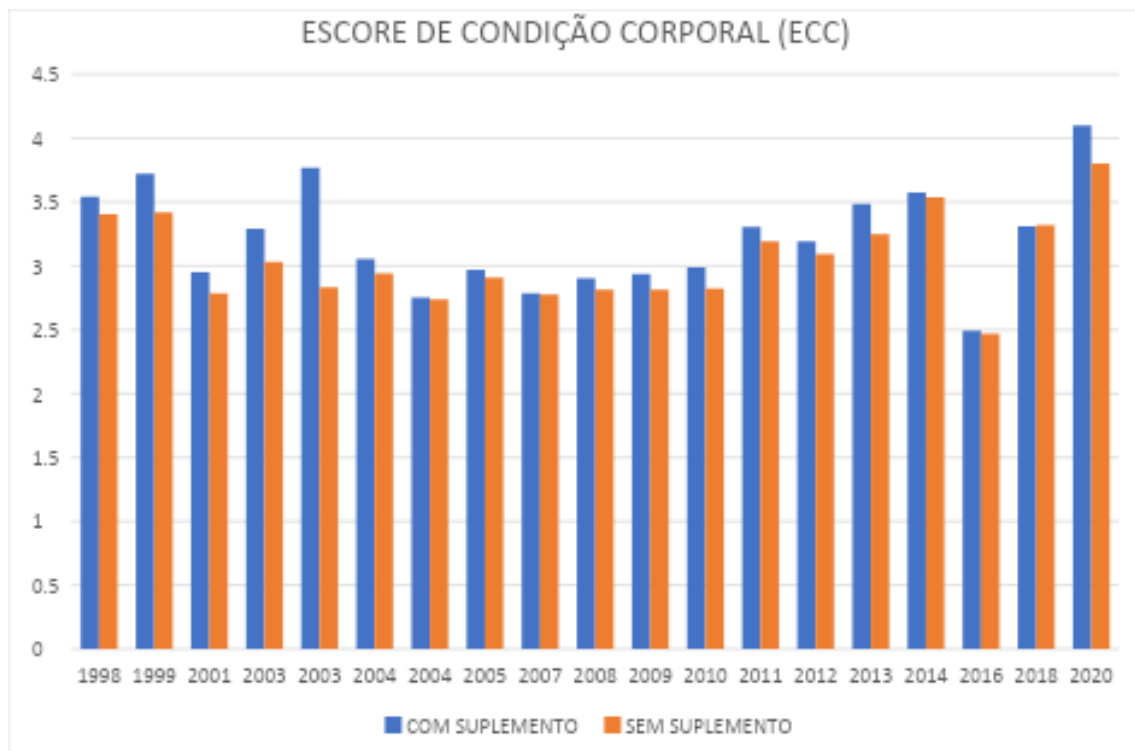


Figura 4. Escore de condição corporal (ECC) obtido em experimentos avaliando o uso de suplementação energética em pastagens hibernais.

Nas avaliações experimentais, observou-se uma diferença de 0,68 pontos no escore de condição corporal (ECC, escala de 1 a 5) para as fêmeas suplementadas. Segundo Pötter (2008), uma variação de 0,1 ponto no ECC corresponde a aproximadamente 16,6 kg de peso vivo (PV).

3. Considerações finais

O uso de suplementação energética para bezerras de corte mantidas em pastagens hibernais mostrou ser uma estratégia eficiente para alcançar o peso-alvo de acasalamento aos 12–14 meses de idade. O uso de suplemento proporcionou maior ganho de peso individual, incremento no ganho por área e elevação da taxa de lotação. A avaliação da estrutura das pastagens hibernais é fundamental para otimizar o aproveitamento da forragem e do suplemento, assegurando maior eficiência produtiva no sistema.

4. Referências bibliográficas

- ALVES, Marcos. **Desempenho de novilhas de corte para acasalamento aos 14 meses de idade**. 2014. 63f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria.
- AMARAL NETO, Luiz. **Farelo de Arroz Integral na Recria de Bezerras de Corte em Azevém**. 2016. 62f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria.
- AMARAL NETO, Luiz. **Sistemas alimentares para a recria de novilhas de corte**. 2020. 47f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria.
- CARVALHO, Paulo *et al.* Importância da estrutura da pastagem na ingestão e seleção de dietas pelo animal em pastejo. In: A PRODUÇÃO ANIMAL NA VISÃO DOS BRASILEIROS. **Anais...** Piracicaba, 2001. p.853-871.
- DOMINGUES, Camille. **Recria de bezerras de corte em pastagem de azevém submetidas à suplementação**. 2022. 62f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria.
- FERNÁNDEZ, Enrique; MIERES, Juan. **Algunos conceptos sobre el uso de suplementos en los sistemas invernadores**. In: JORNADA PRODUCCION ANIMAL INTENSIVA. INIA La Estanzuela, Colonia, 2005. p.1-10. (Serie de Actividades de Difusión N° 406).

- FREITAS, Fabiana *et al.* Suplementação energética na recria de fêmeas de corte em pastagem cultivada de inverno: produção animal. **Revista Brasileira De Zootecnia**, v. 34, p. 1256–1266, 2004.
- FRIZZO, Adriana *et al.* Suplementação energética da recria de bezerras de corte mantidas em pastagem de inverno. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, p. 643-652, 2001.
- FONSECA NETO, Álvaro. **Crescimento e desenvolvimento reprodutivo de bezerras de corte para acasalamento aos 14 meses**. 2013. 71f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria.
- GAI, Guilherme. **Recria de bezerras recebendo ou não suplemento energético em pastagem de azevém**. 2015. 61f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria.
- HORN, G.W. *et al.* Influence of hight starch vs. hight fiber energy supplements on steers grazing summer native rangeland. **Journal Animal Science**, v.73, n.1, p.45-54, 1995. <https://doi.org/10.2527/1995.73145x>.
- LEMENAGER, R.P. *et al.* Effects of winter and summer energy levels on heifer growth and reproductive performance. **Journal of Animal Science**, v. 51, n. 4, p. 837-842, 1980. <https://doi.org/10.2527/jas1980.514837x>.
- MACARI, Stefani. **Recria de fêmeas de corte para acasalamento aos 18 meses de idade**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2005. 97f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria.
- MIERES, Juan. Tipo de suplemento y su efecto sobre el forraje. In: MARTINS, D. V. **Suplementacion Estratégica para el Engorde de Ganado**. Montevideo: Dpto. Producción Animal, INIA, 1997. 11p. Serie Técnica 83.
- NESPro – Carta Conjuntural NESPro – Bovinocultura de Corte do RS – Nº 14 (Out-Dez 2024), Porto Alegre, 2024 93p.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL - NRC. Nutrient requirements of beef cattle. 7ed. Washington: National Academy Press, 1996. 90p.
- OLIVEIRA, Ana Paula. **Uso de grão de milho inteiro ou laminado como suplemento para bezerras de corte em pastejo em azevém**. 2012. 61f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria.
- PILAU, Alcides. **Alternativas de utilização de suplementação energética para recria de novilhas de corte em pastagem cultivada de inverno**. 2003. 117f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria.

- PÖTTER, Luciana. **Uso de suplementos em pastagem cultivada de inverno para bezerras de corte**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria.
- PÖTTER, Luciana *et al.* Suplementação com concentrado para bezerras de corte mantidas em pastagens cultivadas de estação fria. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 39(5), 992-1001. 2010.
- ROCHA, Marta *et al.* Produção animal e retorno econômico da suplementação em pastagem de aveia e azevém. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33 (3), p. 573-578, 2003.
- ROCHA, Marta.; LOBATO, Fernando. P. Sistemas de Alimentação Pós-desmama de Bezerras de Corte para Acasalamento 14/15 Meses de Idade. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.31, n.4,p.1814-1822, 2002.
- ROCHA, Marta; LOBATO, Fernando. Sistemas de alimentação pós-desmama de novilhas de corte para acasalamento com 14/15 meses de idade. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.31, n.4,p. 1814-1822, 2002b.
- ROSA, Aline *et al.* Recria de bezerras de corte em pastagem de azevém sob frequências de suplementação. **Ciência Rural**, v. 40, p. 2549-2554, 2010.
- ROSA, Aline. **Comportamento ingestivo e consumo de forragem por novilhas de corte recebendo suplementos em pastagem de azevém**. 2011. 71f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria.
- ROSA, Juliane. **Recria de bezerras em azevém recebendo suplemento sob diferentes formas de fornecimento**. 2022. 46f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Santa Maria.
- ROSA, Vanessa. **Suplementação mineral e energética para novilhas de corte em pastagens cultivadas**. 2022. 50f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria.
- ROSO, Dalton. **Recria de bezerras de corte em alternativas de uso da pastagem de azevém (*Lolium multiflorum* Lam.)**. 2007. 87f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria.
- ROSO, Dalton *et al.* Recria de bezerras de corte em alternativas de uso da pastagem de azevém. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, n.2, p.240-248, 2009.
- ROSO, Dalton. **Alternativas forrageiras para sistemas de recria de novilhas de corte**. 2011. 99f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria.
- SANTOS, Davi. **Avaliação bioeconômica do uso de suplementos energéticos na recria de novilhas de corte em pastagens cultivadas de**

verão e inverno. 2003. 104f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria.

SIMEONE, Álvaro; BERETTA, V. Uso de alimentos concentrados en sistemas ganaderos. Es buen negocio suplementar al ganado? In: JORNADA DE LA UNIDAD DE PRODUCCIÓN INTENSIVA DE CARNE, 10., 2004, Paysandú. **Anais...** Paysandú: Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni, Facultad de Agronomía, 2004. p. 10-19.

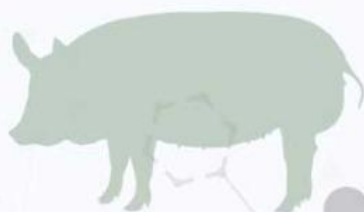
VICENTE, Juliano. **Desempenho de bezerras de corte em azevém (*Lolium multiflorum* Lam.), sob dois métodos de pastoreio, com ou sem o fornecimento de suplemento energético.** 2022. 48f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria.

VICENTE, Juliano. **Recría de bezerras de corte sob pastejo exclusivo em azevém ou em azevém consorciado com leguminosas.** 2017. 61f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria.

Autores

Érica Dambros de Moura, Fabielly de Jesus Depra dos Santos, Eduarda Proença de Oliveira, Bruna Fernandes Machado, Dinah Pereira Abbott, Marta Gomes da Rocha, Luciana Pötter

Departamento de Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.



www.meridapublishers.com