

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 ($P \geq 0,273$).

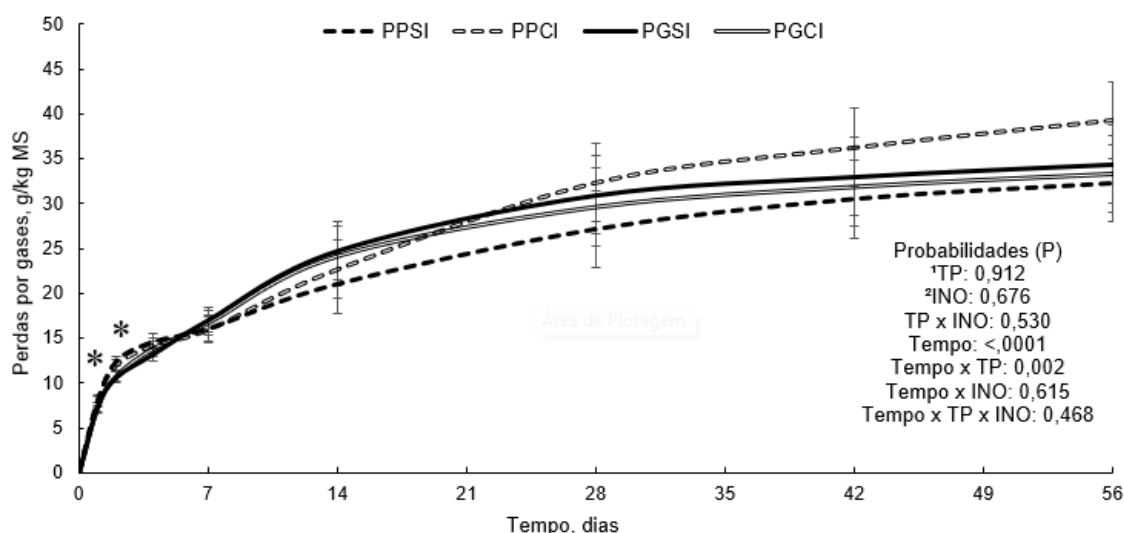


Figura 2. Perdas por gases (g/Kg MS), em silagem de planta inteira de milho durante o processo fermentativo

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.

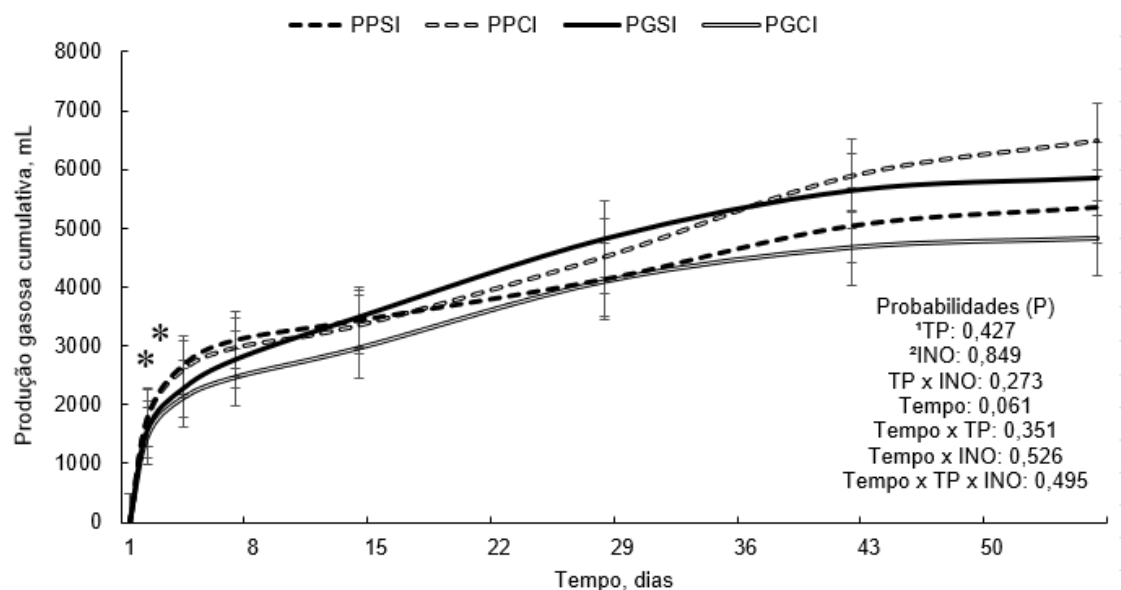


Figura 3. Produção cumulativa de gases (mL), em silagem de planta inteira de milho

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).

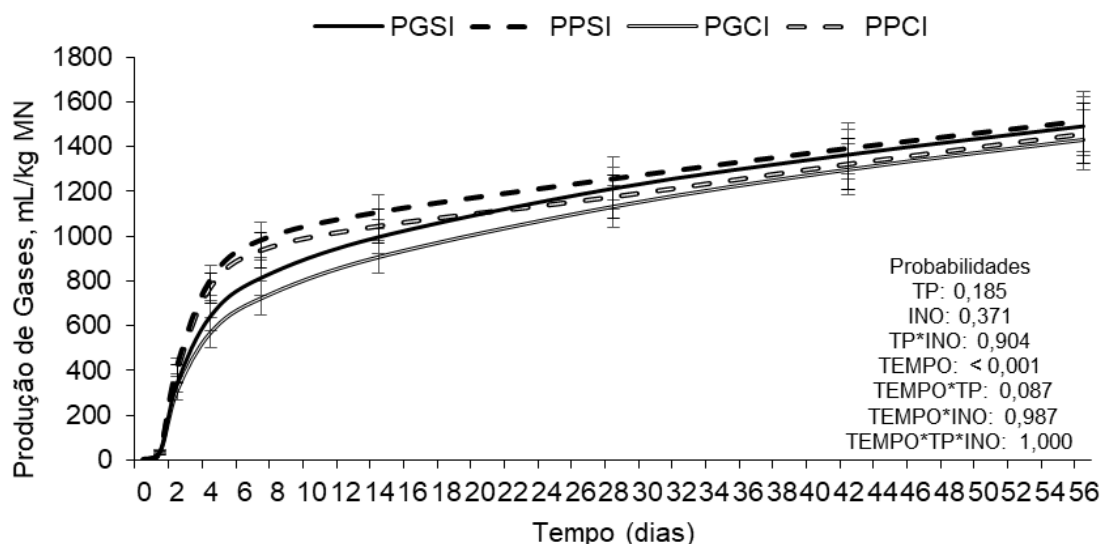


Figura 4. Produção de gases na ensilagem de grão de milho reidratado

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 CO_2 (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 CO_2 , principalmente nas fases iniciais, quando a atividade microbiana é mais intensa e o processo ainda não está completamente estabilizado.

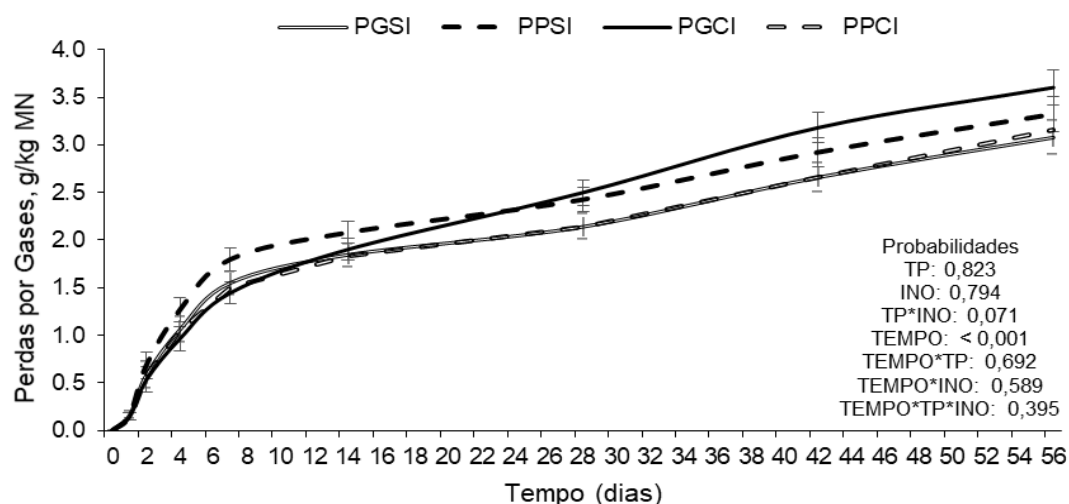


Figura 5. Perdas por gases (g/kg MN) na ensilagem de grão de milho reidratado

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.