



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

Faculdade de Ciências Agrárias

Programa de Pós-Graduação em Zootecnia



CARACTERÍSTICAS FERMENTATIVAS E VALOR NUTRICIONAL DE SILAGENS DE MILHO COM ÓLEOS ESSENCIAIS

Paulo Lopez Carnavale

Zootecnista

Dourados - MS

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

Faculdade de Ciências Agrárias

Programa de Pós-Graduação em Zootecnia



CARACTERÍSTICAS FERMENTATIVAS E VALOR NUTRICIONAL DE SILAGENS DE MILHO COM ÓLEOS ESSENCIAIS

Paulo Lopez Carnavale

Orientador: Prof. Dr. Mábio Silvan José Da Silva

**Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Lucas Terra
Peixoto**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia da Universidade Federal da Grande Dourados – Faculdade de Ciências Agrárias, para obtenção do título de Mestre em Zootecnia.

Dourados – MS

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

C288c Carnavale, Paulo Lopez
CARACTERÍSTICAS FERMENTATIVAS E VALOR NUTRICIONAL DE SILAGENS DE
MILHO COM ÓLEOS ESSENCIAIS [recurso eletrônico] / Paulo Lopez Carnavale. -- 2026.
Arquivo em formato pdf.

Orientador: Mábio Silvan José Da Silva.
Coorientador: Eduardo Lucas Terra Peixoto .
Dissertação (Mestrado em Zootecnia)-Universidade Federal da Grande Dourados,
2026.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Aditivos. 2. carvacrol. 3. cinamaldeído. 4. estabilidade aeróbia. 5. fermentação. I.
Silva, Mábio Silvan José Da. II. Peixoto, Eduardo Lucas Terra. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

V

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

CARACTERÍSTICAS FERMENTATIVAS E VALOR NUTRICIONAL DE SILAGENS DE MILHO COM ÓLEOS ESSENCIAIS

Paulo Lopez Carnavale

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 05 de março de 2026, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Documento assinado digitalmente
 **MARCO ANTONIO PREVIDELLI ORRICO JUNIOR**
Data: 08/05/2026 12:00:05-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Marco Antonio Previdelli
Orrico Junior
UFGD - Universidade Federal da
Grande Dourados

Documento assinado digitalmente
 **JOAO LUIZ PRATTI DANIEL**
Data: 08/05/2026 12:20:42-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. João Luiz Pratti Daniel
UEM - Universidade Estadual de
Maringá

Documento assinado digitalmente
 **MABIO SILVAN JOSE DA SILVA**
Data: 08/05/2026 12:27:43-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Mábio Silvan José Da Silva
Orientador - UFGD

BIOGRAFIA DO AUTOR

PAULO LOPEZ CARNAVALE, filho de Valdemir de Matos Carnavale e Nelly Beatriz Lopez Landolfi Carnavale, nasceu em Ponta Porã, Mato Grosso do Sul, no dia 18 de fevereiro de 1997. Em março de 2014, iniciou o curso de graduação em Zootecnia pela Universidade Federal da Grande Dourados, concluindo em dezembro de 2021. Em março de 2024, ingressou no Programa de Pós Graduação em Zootecnia pela Universidade Federal da Grande Dourados, em nível de Mestrado, área de concentração Produção Animal, realizando estudos na área de Conservação de Forragens. Em dezembro de 2025, submeteu-se ao exame geral de qualificação. Em março de 2026, submeteu-se ao exame de defesa da dissertação.

EPÍGRAFE

“Meus irmãos, sintam-se felizes quando
passarem por todo tipo de aflições.
Pois vocês sabem que, quando sua fé
vence essas provações, ela produz
perseverança.”
(Tiago 1:2-3)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Valdemir e Beatriz,
aos meus irmãos, Giovane e Augusto,
e a minha companheira de vida, Isabella
com muito carinho, a vocês...

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por ter me dado força para concluir esta etapa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia da Universidade Federal da Grande Dourados, pela oportunidade de realização do mestrado.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao orientador Prof. Dr. Mábio Silvan José Da Silva, por sua valiosa orientação, paciência nos momentos difíceis, risadas nos momentos alegres e direcionamento da pesquisa.

Ao coorientador, Prof. Dr. Eduardo Lucas Terra Peixoto, pela contribuição e apoio prestados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pela contribuição dada ao trabalho e pela disponibilidade em estarem presentes.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, pelos valiosos ensinamentos.

Aos membros do Núcleo de Estudos em Pastagens e Autonomia Forrageira - NEPAF, pela amizade e auxílio nos trabalhos de campo e análises em laboratório. Agradeço a cada um com muito carinho, pois colaboraram muito na realização deste trabalho. Muito obrigado!

As funcionárias dos laboratórios de Forragicultura (LAFOR - TPA e Bioquímica Agropecuária) e laboratório de Nutrição Animal (LANA), Phaena Faria e Maria Gizelma, pelo apoio e auxílio na condução das análises laboratoriais.

A minha companheira de vida Isabella Fritz Branquinho, pelo amor e por não medir esforços para me ajudar nos trabalhos acadêmicos, em análises de laboratório e nos estudos. Obrigado pelo apoio, companheirismo nos momentos bons e principalmente nos ruins, por ter sido paciente com minhas faltas de paciência.

Obrigado pelo incentivo em todos os momentos, sendo essencial no cumprimento desta jornada.

Ao meu grande amigo, Giuliano Reis Pereira Muglia, pelo apoio em todas as fases do projeto, ensinamentos, paciência e parceria.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram neste sonho, muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	II
LISTA DE TABELAS	III
LISTA DE ABREVIATURAS	IV
RESUMO.....	VI
ABSTRACT.....	VII
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Importância do milho e da silagem de milho	2
2.2. Qualidade de silagens.....	4
2.2.1. Perdas Fermentativas e Estabilidade Aeróbia	6
2.3 Óleos Essenciais.....	11
2.3.1. Atividade antimicrobiana.....	11
2.3.3. Efeitos dos óleos essenciais na fermentação de silagens	15
2.3.4. Efeitos na estabilidade aeróbia	16
REFERÊNCIAS.....	18
CAPÍTULO 2 – QUALIDADE FERMENTATIVA, COMPOSIÇÃO NUTRICIONAL ESTABILIDADE AERÓBIA DE SILAGENS DE MILHO COM DIFERENTES DOSES DE ÓLEOS ESSENCIAIS.....	26
INTRODUÇÃO	27
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	28
4. RESULTADOS.....	33
5. DISCUSSÃO	43
6. CONCLUSÃO	53
7. REFERÊNCIAS.....	53
CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	59

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. (A) Perdas por gases - PGAS e (B) perdas por efluentes - PEFLU de silagens de milho com diferentes doses de blend de óleos essenciais.....	41
FIGURA 2. (A) Teores de Matéria seca - MS e (B) matéria orgânica - MO de silagens de milho com diferentes doses de blend de óleos essenciais.....	43
FIGURA 3. (A) Extrato etéreo – EE, (B) proteína bruta – PB e (C) nitrogênio total – Ntotal de silagens de milho com diferentes doses de blend de óleos essenciais.....	44
FIGURA 4. Carboidratos totais – CHT de silagens de milho com diferentes doses de blend de óleos essenciais.....	45
FIGURA 5. Registro das temperaturas médias dos silos experimentais com adição de blend de óleos essenciais e da temperatura ambiente para cada horário monitorado.....	46
FIGURA 6. Diferença de temperaturas (silagem e ambiente) em silagens de milho, com diferentes doses de blend de óleos essenciais, exposta ao oxigênio.....	47
FIGURA 7. Registro das medidas de pH dos silos experimentais com adição de blend de óleos essenciais para cada horário monitorado.....	47
FIGURA 8. Teores de etanol em silagens de milho com diferentes doses de blend de óleos essenciais	49
FIGURA 9. (A) Teores de acetato de etila e (B) ácido propiônico em silagens de milho com diferentes doses de blend de óleos essenciais.....	50

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Categorias e grupos funcionais de aditivos segundo a normativa 13/2004 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.....	10
TABELA 2. Valores de perdas fermentativas em silagens com adição de óleos essenciais.....	34
TABELA 3. Composição bromatológica de silagem de milho com adição de óleos essenciais.....	35
TABELA 4. Parâmetros fermentativos de silagem de milho com adição de níveis de óleos essenciais.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS

ABREVIATURA	SIGNIFICADO
AB1	Fração de Carboidratos Não Fibrosos (A+B1)
B2	Fração de Carboidratos Fibrosos de Degradação Potencial
C	Fração de Carboidratos Indigestíveis
CEL	Celulose
CHT	Carboidratos Totais
CIM	Concentração Inibitória Mínima
DIVMS	Digestibilidade <i>In Vitro</i> da Matéria Seca
EE	Extrato Etéreo
EPM	Erro-Padrão da Média
FDA	Fibra em Detergente Ácido
FDN	Fibra em Detergente Neutro
FDNcp	Fibra em Detergente Neutro Corrigida para Cinzas e Proteína
HCEL	Hemicelulose
LIG	Lignina
MFMV	Massa de Forragem Verde
MO	Matéria Orgânica
MS	Matéria Seca
N	Nitrogênio
NDT	Nutrientes Digestíveis Totais
NNP	Nitrogênio Não Proteico
OE	Óleos Essenciais
PB	Proteína Bruta
PEFLU	Perdas por efluentes
PGAS	Perdas por Gases
RMV	Recuperação de Matéria Verde
RMS	Recuperação de Matéria Seca

UR	Umidade Relativa
----	------------------

PERDAS FERMENTATIVAS E VALOR NUTRICIONAL DE SILAGENS DE MILHO COM ÓLEOS ESSENCIAIS

RESUMO – Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da adição de um blend de óleos essenciais (75% carvacrol e 25% cinamaldeído) nas perdas fermentativas, composição bromatológica e estabilidade aeróbia de silagens de milho (*Zea mays* L., cv. BRS 2223). O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições, utilizando doses de 0, 200, 400, 600 e 800 mg kg⁻¹ de massa verde, aplicadas antes da ensilagem, em silos laboratoriais vedados por 60 dias, com análises incluindo composição química (matéria seca, matéria orgânica, proteína bruta, extrato etéreo, fibras, carboidratos, digestibilidade in vitro), perdas (gases, efluentes, matéria orgânica), perfil fermentativo (ácido lático, ácido acético, ácido butírico, acetato de etila, etanol, ácido propiônico), e estabilidade aeróbia (temperatura e pH por 177 horas). Os resultados demonstraram efeitos quadráticos significativos para matéria seca (máximo de 34,5% a 200 mg kg⁻¹), matéria orgânica (94,5% a 200 mg kg⁻¹), carboidratos totais (77,5% a 400 mg kg⁻¹) e fração A+B1 (55% a 400 mg kg⁻¹), com diminuição linear na proteína bruta (atingindo mínimo de 7,08% a 800 mg kg⁻¹) e aumento linear no extrato etéreo (atingindo máximo de 3,73% a 800 mg kg⁻¹), sugerindo relação inversa entre esses componentes, possivelmente devido à ação antimicrobiana do blend sobre a degradação proteica e retenção de lipídeos; as perdas por gases e efluentes foram mínimas a 400 mg kg⁻¹ (redução de 42% em relação ao controle), sem diferenças na recuperação de matéria seca, e o perfil fermentativo exibiu efeitos quadráticos para etanol (máximo de 0,23 mg kg⁻¹ a 600 mg kg⁻¹), acetato de etila (máximo de 600 mg kg⁻¹) e ácido propiônico (mínimo de 400 mg kg⁻¹), com ácido lático atingindo máximo nominal de 6,86% a 200 mg kg⁻¹, sem significância estatística. Os teores de ácido acético, ácido butírico, acetona e metanol não foram afetados, indicando modulação seletiva da fermentação anaeróbica. Na estabilidade aeróbia, todas as doses inibiram aquecimento, mantendo temperaturas 2°C abaixo da temperatura ambiente, ao contrário do controle. Conclui-se que o blend modula positivamente a fermentação, reduz perdas e melhora a conservação, com doses de 200-400 mg kg⁻¹, otimizando eficiência fermentativa, preservação nutricional e estabilidade aeróbia em condições tropicais, promovendo sustentabilidade na produção de silagem.

Palavras-chave: Aditivos, carvacrol, cinamaldeído, estabilidade aeróbia, fermentação.

FERMENTATIVE LOSSES AND NUTRITIONAL VALUE OF MAIZE SILAGES WITH ESSENTIAL OILS

ABSTRACT – This study aimed to evaluate the effects of adding an essential oil blend (75% carvacrol and 25% cinnamaldehyde) on fermentative losses, chemical composition, and aerobic stability of corn silage (*Zea mays* L., cv. BRS 2223). The experiment was conducted in a completely randomized design with five replicates, using doses of 0, 200, 400, 600, and 800 mg kg⁻¹ of fresh matter applied before ensiling in laboratory silos sealed for 60 days. Analyses included chemical composition (dry matter, organic matter, crude protein, ether extract, fiber fractions, carbohydrates, in vitro digestibility), losses (gases, effluents, organic matter), fermentative profile (lactic acid, acetic acid, butyric acid, ethyl acetate, ethanol, propionic acid), and aerobic stability (temperature and pH for 177 hours). The results demonstrated significant quadratic effects for dry matter (maximum 34.5% at 200 mg kg⁻¹), organic matter (94.5% at 200 mg kg⁻¹), total carbohydrates (77.5% at 400 mg kg⁻¹), and A+B1 fraction (55% at 400 mg kg⁻¹), with a linear decrease in crude protein (reaching a minimum of 7.08% at 800 mg kg⁻¹) and a linear increase in ether extract (reaching a maximum of 3.73% at 800 mg kg⁻¹), suggesting an inverse relationship between these components, possibly due to the antimicrobial action of the blend on protein degradation and lipid retention. Gas and effluent losses were minimal at 400 mg kg⁻¹ (42% reduction compared to the control), with no differences in dry matter recovery. The fermentative profile exhibited quadratic effects for ethanol (maximum of 0.23 mg kg⁻¹ at 600 mg kg⁻¹), ethyl acetate (maximum at 600 mg kg⁻¹), and propionic acid (minimum at 400 mg kg⁻¹), with lactic acid reaching a nominal maximum of 6.86% at 200 mg kg⁻¹ without statistical significance. The levels of acetic acid, butyric acid, acetone, and methanol were unaffected, indicating selective modulation of anaerobic fermentation. Regarding aerobic stability, all doses inhibited heating, maintaining temperatures 2°C below ambient temperature, unlike the control. It is concluded that the blend positively modulates fermentation, reduces losses, and improves preservation, with doses of 200–400 mg kg⁻¹ optimizing fermentative efficiency, nutritional preservation, and aerobic stability under tropical conditions, promoting sustainability in silage production.

Keywords: Additives, carvacrol, cinnamaldehyde, aerobic stability and fermentation.

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1. INTRODUÇÃO

A pecuária brasileira sustenta sua competitividade internacional com base em sistemas de produção predominantemente pastoris. No entanto, a sazonalidade climática característica de regiões tropicais e subtropicais impõe um desafio crítico: a escassez de forragem de qualidade durante o período de estiagem. Essa limitação compromete a produtividade e a eficiência dos rebanhos, tornando imprescindível a adoção de estratégias de suplementação alimentar. Neste cenário, a conservação de forragens, por meio da ensilagem, posiciona-se como uma tecnologia fundamental para garantir a oferta de volumoso de qualidade ao longo do ano.

Dentre as culturas utilizadas para ensilagem no Brasil, o milho (*Zea mays* L.) destaca-se por sua ampla adaptação, elevada produtividade de massa e excelente valor energético, constituindo-se na base da alimentação volumosa em sistemas de produção intensiva de leite e carne. Contudo, a qualidade final da silagem de milho é frequentemente comprometida por processos fermentativos indesejáveis, que resultam em perdas significativas de matéria seca e nutrientes, além de reduzir a estabilidade aeróbia pós-abertura do silo. Essas perdas representam um prejuízo econômico direto e podem limitar o desempenho animal, demandando o aprimoramento das técnicas de conservação.

Tradicionalmente, a busca por uma fermentação mais eficiente e estável tem recorrido ao uso de aditivos químicos ou inoculantes microbianos. Entretanto, frente a uma crescente demanda do mercado por práticas sustentáveis e produtos naturais, os óleos essenciais (OE) emergem como uma alternativa fitogênica promissora. Derivados de plantas aromáticas, esses compostos secundários apresentam reconhecida atividade antimicrobiana, antioxidante e moduladora da fermentação. Especificamente, o carvacrol e o cinamaldeído, componentes majoritários de óleos como os de orégano e canela, respectivamente, demonstram potente ação contra microrganismos deteriorantes, como fungos, leveduras e bactérias do gênero *Clostridium*, frequentemente associados a perdas qualitativas nas silagens.

Embora estudos preliminares apontem para o potencial dos OE na ensilagem, a literatura ainda apresenta lacunas e resultados contraditórios, especialmente no que diz respeito à dosagem ideal e aos efeitos sinérgicos de blends específicos sobre a fermentação e a estabilidade aeróbia de silagens de milho em condições tropicais. Grande parte das pesquisas concentra-se na avaliação de óleos isolados ou em condições experimentais distintas das encontradas no Cerrado brasileiro, o que limita a extrapolação dos resultados para a realidade produtiva nacional.

Diante desse contexto, foi proposto com este estudo avaliar os efeitos da adição de um blend de óleos essenciais (carvacrol 75% e cinamaldeído 25%) sobre as perdas fermentativas, o valor nutricional e a estabilidade aeróbia de silagens de milho.

O trabalho busca não apenas elucidar os efeitos do aditivo sobre as perdas fermentativas e o perfil nutricional, mas também fornecer parâmetros técnicos claros sobre a faixa de dosagem mais eficaz para otimizar a fermentação e, principalmente, ampliar a estabilidade aeróbia do produto final. Dessa forma, busca-se contribuir com uma alternativa prática e sustentável para a melhoria da qualidade da silagem, gerando conhecimento aplicável que atenda às demandas contemporâneas por eficiência produtiva aliada ao uso de insumos naturais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância do milho e da silagem de milho

O milho (*Zea mays* L.) é um dos principais cereais cultivados no Brasil e desempenha papel estratégico tanto na alimentação humana e industrial, quanto na alimentação animal, sendo amplamente utilizado na forma de grãos e silagem. O país é um dos maiores produtores mundiais, sustentado por dois ciclos produtivos principais: a primeira safra (verão) e a segunda safra (safrinha), esta última responsável pela maior parte da produção nacional de grãos (Conab, 2024).

De acordo com dados oficiais da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), a safra 2023/24 de milho apresentou área total cultivada próxima de 22,1 milhões de hectares, com produtividade média nacional estimada em torno de 5.700 kg/ha de grãos, resultando em uma produção total de aproximadamente 122,7 milhões

de toneladas. Esses números constam nos boletins de safra de grãos elaborados pela Conab, que reúnem as estimativas por estado e por tipo de safra (1ª, 2ª e 3ª) (Conab, 2024).

Segundo informações da Pesquisa Agrícola Municipal (PAM) de 2023, a produção total de milho no país foi de cerca de 132,0 milhões de toneladas, cultivadas em uma área colhida de aproximadamente 22,3 milhões de hectares (IBGE, 2024). O levantamento reforça a importância do cereal para a economia agropecuária brasileira, tanto pelo volume produzido quanto pela amplitude territorial da cultura.

Embora sistemas de produção exclusivamente pastoris apresentem vantagens operacionais e econômicas, sua sustentabilidade é comprometida pela estacionalidade na produção de forragens (Jobim et al., 2005). Conforme demonstrado por Fontaneli & Fontaneli (2009), estes períodos de escassez são caracterizados por significativas perdas ponderais e redução na capacidade produtiva dos rebanhos, justificando a suplementação estratégica com reservas forrageiras conservadas.

Dentre as formas de conservação de forragens, a ensilagem é uma das formas mais adotadas, devido a menor dependência de fatores ambientais no processo de produção e conservação. Na bovinocultura de leite tecnificada, o uso da silagem de milho é imperativo, por proporcionar forragem conservadas de elevado valor nutricional e a preços baixos, quando comparada a outras fontes alimentares (do Rêgo, 2014; Khan et al., 2015).

No que se refere à utilização do milho para silagem, observa-se que não há, até o momento, uma estatística oficial nacional que discrimine com precisão a fração do milho destinada à ensilagem. Órgãos oficiais como a Conab e o IBGE contabilizam a produção e a área total de milho, sem especificar o destino final (grãos ou silagem).

A expansão do uso do milho para silagem tem sido impulsionada pela crescente demanda de volumosos de alta qualidade para sistemas de produção de bovinos de leite e de corte, especialmente em regiões onde a sazonalidade de pastagens compromete a oferta de alimento ao longo do ano. O milho destaca-se entre as culturas ensiladas por apresentar elevado potencial produtivo, bom valor energético e excelente palatabilidade. Fatores estes que favorecem ganhos de desempenho animal e maior eficiência alimentar.

Estudo recente sobre os programas de alimentação com silagem empregados em rebanhos leiteiros de alta produção demonstrou que a silagem de milho foi utilizada em todas as propriedades avaliadas (do Rêgo, 2014). Na pecuária de corte, a silagem de milho e suas derivações representam a principal fonte de forragem em dietas de terminação (Oliveira; Millen, 2014; Pinto; Millen, 2018).

2.2. Qualidade de silagens

O valor nutritivo da silagem se correlaciona diretamente com a composição química e a digestibilidade da forrageira no momento do corte, uma vez que o objetivo central do processo de ensilagem é preservar essas características no material conservado. Neste contexto, o termo “qualidade fermentativa” refere-se à eficiência do processo fermentativo em manter as propriedades nutricionais originais da forragem durante o período de conservação (Tomich et al., 2003).

A planta de milho atende aos requisitos fundamentais para produção de silagem de qualidade, apresentando teor ideal de matéria seca entre 30,0% e 35,0%, concentração mínima de 3,0% de carboidratos solúveis em base da matéria natural, baixa capacidade tampão e condições favoráveis para fermentação microbiana eficiente (Nussio; Campos; Dias, 2001).

Contudo, além da cultura empregada, a qualidade das silagens é determinada pelas características do material ensilado e pelo perfil microbiano atuante durante todo o processo de conservação, desde a ensilagem até o fornecimento aos animais. Consequentemente, o valor nutritivo das silagens encontra-se diretamente relacionado com as características agrônômicas da forragem e com a eficiência do método de conservação adotado (De Sousa, 2020).

A ensilagem caracteriza-se por uma sucessão de eventos bioquímicos e microbianos que, após estabilização, propiciam a conservação da forragem até o período de utilização. Essa dinâmica pode ser categorizada em distintas fases, sendo elas:

Fase aeróbia: também conhecida como heterofermentação, esta etapa inicia-se durante o carregamento do silo e persiste até a completa depleção do oxigênio residual (Jobim; Nussio, 2013). A presença de oxigênio, associada à disponibilidade de carboidratos solúveis e nutrientes no substrato em processo de ensilagem,

potencializa a respiração celular e estabelece condições favoráveis para o desenvolvimento de microrganismos indesejáveis, naturalmente presentes no material vegetal, como leveduras, fungos filamentosos e enterobactérias. Como consequência metabólica, observa-se a produção de dióxido de carbono, ativação de enzimas proteolíticas e geração de amônia, acetato, etanol, água e energia térmica (McAllister; Hristov, 2000; Pahlow et al., 2003). Embora inevitável, esta fase deve ser minimizada temporalmente para reduzir perdas nutricionais significativas.

A segunda fase da ensilagem compreende os períodos designados como anaeróbio 1 e anaeróbio 2 (Jobim; Nussio, 2013). Com a depleção do oxigênio residual pela atividade microbiana aeróbia, instaura-se a fase anaeróbia 1, caracterizada pelo desenvolvimento exponencial de bactérias ácido-láticas. Estas metabolizam carboidratos solúveis, convertendo-os em ácidos orgânicos, notadamente láctico e acético, iniciando assim a acidificação do substrato (Pahlow et al., 2003). A consequente redução do pH inibe o desenvolvimento de bactérias fibrolíticas e de linhagens heterofermentativas neutrófilas, estabelecendo as condições para o início da fase anaeróbia 2 (Jobim; Nussio, 2013).

Posteriormente, na fase anaeróbia 2, observa-se dominância exclusiva de bactérias lácticas homofermentativas (fermentam a glicose predominantemente pela via glicolítica, produzindo ácido láctico como principal produtor final) e heterofermentativas (fermentam a glicose pela via das pentoses-fosfato, gerando ácido láctico, CO₂, etanol e/ou ácido acético), que promovem rápida redução do pH, mediante produção significativa de ácido acético, atingindo valores próximos a 3,8. Esta acidificação pronunciada marca o término do período de fermentação ativa e o início da terceira fase do processo de conservação (Jobim; Nussio, 2013; Pahlow et al., 2003).

Com a estabilização do pH em 3,8, ocorre a saturação ácida do meio, marcando o início da fase de estabilidade. Neste estágio, observa-se a inativação microbiana e a manutenção da acidez em níveis constantes (McDonald et al., 1981). Esta constitui a fase mais crítica do processo, uma vez que, alcançada a estabilidade, o material ensilado pode ser conservado por períodos prolongados.

A fase final do processo caracteriza-se pela instabilidade aeróbia, decorrente da exposição da silagem ao oxigênio, após abertura do silo. Nesse estágio, observa-

se a proliferação de leveduras, as quais catalisam a degradação de carboidratos e ácido láctico, gerando dióxido de carbono, calor e água como produtos metabólicos. A consequente redução na concentração de ácidos orgânicos eleva o pH do material, estabelecendo condições favoráveis para o desenvolvimento de microbiota deteriorante (Kleinschmit; Schmidt; Kung, 2005; Liu et al., 2020).

Na prática, falhas operacionais em qualquer fase do processo de ensilagem, descrito anteriormente, podem induzir desvios fermentativos críticos, com reflexos diretos nas perdas fermentativas e qualidade final da silagem.

2.2.1. Perdas Fermentativas e Estabilidade Aeróbia

Perdas de matéria seca e alterações qualitativas ocorrem ao longo de todas as etapas do processo de ensilagem, comprometendo o valor nutricional do produto final. Os principais estágios associados a essas perdas incluem: a colheita no campo, a respiração tecidual e fermentação, a produção de efluentes e a exposição ao oxigênio durante o armazenamento e desabastecimento (Borreani et al., 2018).

A respiração tecidual da forragem constitui o principal mecanismo de consumo de oxigênio no interior do silo, embora a atividade respiratória de microrganismos aeróbicos também contribua significativamente (Borreani et al., 2018). Considerando que tanto a respiração vegetal quanto a microbiana utilizam o mesmo substrato (carboidratos solúveis), ocorrem alterações nas concentrações relativas de proteína bruta (PB), fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA) e lignina (LIG), cujos teores aumentam proporcionalmente devido às perdas de massa seca. Adicionalmente, verifica-se a conversão parcial de proteína verdadeira em nitrogênio não proteico (NNP) durante este processo (Rotz; Muck, 1994).

Conforme Brüning et al., (2017) , o atraso na vedação do silo eleva as concentrações de fibra em detergente neutro (FDN) na abertura. Mills e Kung (2002) atribuem o incremento nos teores de FDN à depleção de carboidratos solúveis durante o período pré-ensilagem. Adicionalmente, Hoedtke et al. (2010) relataram que a fração de nitrogênio não proteico (NNP) pode aumentar de 50% a 70% durante o armazenamento, como consequência de processos proteolíticos.

A densidade de compactação constitui fator determinante na qualidade da silagem, sendo influenciada pelo tamanho médio de partícula, teor de umidade do

material e eficiência operacional da compactação. Partículas forrageiras superiores a 19 mm elevam a porosidade da massa ensilada, comprometendo a compactação e aumentando o oxigênio residual. Esta condição favorece processos deteriorativos mediante respiração tecidual residual e desenvolvimento de microbiota indesejável (Borreani et al., 2018; Brüning et al., 2018). A redução na densidade de compactação diminui a estabilidade aeróbia pós-abertura do silo e incrementa as perdas durante o desabastecimento (Hentz et al., 2017; Krüger et al., 2017).

Conforme Mc Donald et al. (1991), as perdas inerentes ao processo de produção de silagem decorrem de múltiplos fatores, incluindo respiração, fermentação, efluentes e deterioração aeróbia, podendo ser categorizadas em evitáveis e inevitáveis. As perdas classificadas como inevitáveis originam-se da respiração do oxigênio residual, do processo fermentativo natural, da exsudação de efluentes e da colheita em campo, representando de 7 a 10% da matéria seca total. Em contrapartida, as perdas evitáveis resultam predominantemente de fermentações por microrganismos indesejáveis ou de deterioração aeróbia durante o armazenamento ou fase pós-abertura do silo.

A deterioração mais significativa ocorre nas regiões laterais e superiores dos silos, áreas frequentemente sujeitas a deficiente vedação e compactação em função da pressão aplicada ser insuficiente. Consequentemente, o material de cobertura deve apresentar como requisitos essenciais: proteção contra danos mecânicos externos, resistência à radiação ultravioleta prolongada e manutenção das condições anaeróbias no interior da massa ensilada (Bernardes, 2016; Gallo et al., 2016).

A atividade respiratória de microrganismos aeróbios representa o principal fator impactante na qualidade da silagem. A especificidade do substrato metabolizado varia conforme o grupo microbiano: leveduras e bactérias acéticas (BAA) consomem predominantemente compostos solúveis, como açúcares simples e metabólitos fermentativos (Courtin; Spoelstra, 1990). Bacilos utilizam preferencialmente proteínas e determinados polissacarídeos, enquanto fungos filamentosos apresentam maior versatilidade catabólica, degradando carboidratos estruturais e lignina (LIG) (McDonald, 1981).

Dentre as principais estratégias adotadas para modular a fermentação no silo e reduzir perdas nutricionais tem-se: a otimização da eficiência da ensilagem, através

do controle das variáveis de temperatura ambiente, tempo pós-desabastecimento do silo e utilização de aditivos (Daniel; Junges; Nussio, 2015).

A garantia da qualidade da silagem exige monitoramento contínuo das condições de armazenamento, uma vez que os processos de conservação de forragens envolvem perdas nutricionais variáveis ao longo do período de ensilagem. Tais perdas se manifestam, principalmente, na forma de gases e efluentes. A presença destes últimos é, particularmente, crítica, por favorecer o desenvolvimento de bactérias do gênero *Clostridium* e aumento da proteólise. Esses fatores comprometem a qualidade da silagem e podem acarretar riscos à saúde animal. Portanto, o manejo adequado das condições de armazenamento é fundamental para preservar a integridade nutricional da silagem e assegurar a segurança do rebanho (Fernandes; Evangelista; Borges, 2016).

O aumento das perdas fermentativas resulta em maior concentração de compostos voláteis (ácidos, álcoois e ésteres), os quais apresentam efeitos negativos sobre a qualidade da silagem, com reflexos diretos no desempenho de vacas leiteiras (Raun; Kristensen, 2010; Weiss; Kroschewski; Auerbach, 2016).

Reconhece-se atualmente que as transformações ocorridas durante a fase de desabastecimento possuem relevância equivalente às alterações no período de vedação do silo, considerando-se a preservação do valor nutricional e a manutenção da qualidade higiênica da silagem (Borreani; Tabacco, 2010). Expressivo percentual do investimento em produtividade por unidade de área e qualidade bromatológica é comprometido quando ocorre deterioração acelerada da silagem pós-abertura do silo. Assim, tem-se concentrado esforços em estudos que buscam aumentar a estabilidade aeróbia das silagens, principalmente dentro do “novo” cenário de debates sobre a reensilagem ou realocação de silagem.

Por definição, a estabilidade aeróbia consiste na resistência da silagem à deterioração, após exposta ao ar. É um parâmetro quantificado como o tempo necessário para a temperatura da silagem exceder a ambiente em 2°C, o qual representa parâmetro crítico de conservação, pelo aumento da temperatura, estar associado desenvolvimento e metabolismo dos microrganismos na silagem (Moran et al., 1996).

O processo de deterioração aeróbia tem início, predominantemente, com a atividade de leveduras, as quais metabolizam carboidratos solúveis e ácidos orgânicos resultantes da fermentação, elevando progressivamente a temperatura e o pH da massa ensilada (Pahlow et al., 2003). A neutralização progressiva do meio cria condições favoráveis para o desenvolvimento de bacilos e demais bactérias aeróbias, que intensificam a geração de calor. Na fase final, fungos filamentosos consolidam o processo deteriorativo, decompondo os componentes estruturais remanescentes.

A temperatura ambiente e o período de armazenamento exercem influência significativa sobre as perdas fermentativas e a digestibilidade do amido na silagem. Condições de elevada temperatura associadas a reduzidos tempos de estocagem potencializam as perdas fermentativas, comprometendo a estabilidade aeróbia e a degradabilidade ruminal do amido, proteínas e fibras (Daniel; Junges; Nussio, 2015; Bueno et al., 2017).

Elevadas temperaturas ambientais constituem fator limitante na produção de silagem, particularmente pelo estímulo ao desenvolvimento de microbiota deteriorante, como clostrídios e enterobactérias (Adesogan, 2009). Corroborando esta premissa, Kim e Adesogan (2006) constataram que o material ensilado a 40°C apresentou redução significativa na estabilidade aeróbia quando comparado ao processo conduzido a 20°C.

A deterioração aeróbia de alimentos, por fungos filamentosos, ocasiona perdas energéticas e nutricionais, além de riscos de contaminação por micotoxinas (Lindgren; Pahlow; Oldenburg, 2002). Além das perdas econômicas diretas, por redução de matéria seca, a deterioração da silagem pode acarretar prejuízos indiretos significativos, decorrentes da depreciação do valor nutricional, da diminuição da palatabilidade e dos potenciais efeitos negativos sobre o desempenho zootécnico e a sanidade animal (Kung Jr., 1998).

Modificar o padrão de fermentação, de modo a garantir o rápido e predominante desenvolvimento das bactérias ácido lácticas na massa ensilada, com redução da fermentação secundária e consequente redução nas perdas fermentativas, além da melhoria da estabilidade aeróbia, tem sido mandatário nas pesquisas sobre silagens. E, dentre as alternativas possíveis, tem-se o uso de aditivos na massa de forragem ensilada. De acordo com a Instrução Normativa 13/2004 do Ministério da Agricultura,

Pecuária e Abastecimento Mapa,(2004), os aditivos para alimentação animal devem ser registrados e classificados conforme sua função principal (tecnológicos, sensoriais, nutricionais, zootécnicos ou anticoccidianos).

Tabela 1. Categorias e grupos funcionais de aditivos segundo a normativa 13/2004 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Categoria de aditivo	Função geral / exemplo de grupos funcionais
Tecnológicos	Substâncias adicionadas com fins tecnológicos — ex: conservantes, reguladores de acidez, umectantes, adsorventes, agentes que modificam a estrutura ou conservação do alimento.
Sensoriais	Substâncias que alteram ou melhoram as características organolépticas ou visuais do alimento — como corantes/pigmentantes, aromatizantes, palatilizantes.
Nutricionais	Substâncias que visam suprir ou melhorar o valor nutricional do alimento — por exemplo, vitaminas, oligoelementos (minerais), aminoácidos, uréia ou seus derivados.
Zootécnicos	Substâncias ou microrganismos que, quando ingeridos pelos animais, visam melhorar desempenho, digestibilidade, equilíbrio da flora digestiva, etc. Essa categoria engloba: digestivos (como enzimas), equilibradores da flora (probióticos, prebióticos, acidificantes), e “melhoradores de desempenho” (substâncias com efeito positivo na produtividade).
Anticoccidianos	Substâncias destinadas a eliminar ou inibir protozoários (uso profilático/terapêutico), embora essa categoria esteja mais relacionada a medicamentos ou produtos com ação farmacológica, e não tipicamente com aditivos de silagem.

Embora os aditivos convencionais apresentem respostas estabelecidas, observa-se crescente interesse científico e aplicado pelos óleos essenciais como aditivos fitogênicos na ensilagem. Essa notoriedade advém principalmente de sua ação antimicrobiana seletiva em condições anaeróbias, que pode modular beneficamente a fermentação e inibir microrganismos deteriorantes. No entanto, frente à vasta diversidade química dos OE e à complexidade de suas interações no ambiente do silo, o corpo de evidências conclusivas sobre sua eficácia, dosagem ideal

e efeitos na qualidade final da silagem permanece incipiente, sinalizando um campo fértil para investigações futuras que este próximo capítulo se propõe a explorar.

2.3 Óleos Essenciais

Óleos essenciais são metabólitos secundários voláteis produzidos por diversas espécies vegetais, especialmente as aromáticas. Compostos por uma mistura complexa de terpenos e fenilpropanóides, esses óleos apresentam propriedades antimicrobianas (bactericida, virucida e fungicida), além de atividades farmacológicas como analgésica, sedativa, anti-inflamatória, espasmolítica e anestésica local (Kant; Kumar, 2022).

Muitas plantas que possuem óleos essenciais têm sido utilizadas ao longo da história na prática etnoveterinária. A utilização de especiarias, resinas e óleos essenciais são citadas na literatura veterinária desde o século XVIII. Com o desenvolvimento de novas tecnologias no decorrer do último século, o uso de plantas, extratos e óleos essenciais foi substituído por compostos químicos sintéticos na assistência médica e nutricional animal.

A função bactericida e fungicida dos óleos essenciais mostra grande potencial em relação a conservação de forragens, pois, são capazes de auxiliar na modulação fermentativa, atuando no perfil de fermentação, com reflexo na estabilidade aeróbica da silagem, devido sua capacidade de combater bactérias e fungos indesejáveis, que influenciam negativamente a fermentação do alimento.

2.3.1. Atividade antimicrobiana

A adição de óleos essenciais, como aditivos em silagens, tem como principal função as propriedades antimicrobianas presentes nos óleos essenciais, que podem auxiliar e modular a fermentação, como também podem melhorar a estabilidade aeróbia deste material após a sua abertura.

A capacidade dos óleos essenciais e seus compostos de inibir ou eliminar bactérias, seja por ação bacteriostática ou bactericida, fungos e protozoários, está bem documentada na literatura científica (Burt, 2004; Chao; Young; Oberg, 2000; Dorman; Deans, 2000; Smith-Palmer; Stewart; Fyfe, 1998).

Várias pesquisas tem demonstrado que os compostos mais estudados e com melhores respostas são os compostos fenólicos carvacrol, timol e eugenol, mas também relatam os efeitos positivos de outros compostos como cinamaldeído, limoneno, geraniol ou citronelal.

A atividade antimicrobiana de óleos essenciais provenientes de plantas como tomilho, cravo, canela, orégano, hortelã-pimenta e cúrcuma pode ser atribuída à presença de compostos bioativos em sua composição. Esses compostos, que atuam de forma sinérgica ou independente, exercem efeito bacteriostático e fungistático através de seus grupos funcionais característicos, os quais interagem com componentes celulares microbianos, comprometendo sua viabilidade (Evangelista et al., 2022).

Uma das maneiras pelas quais os compostos de óleo essencial atuam como antimicrobianos é pela rápida depleção do pool de ATP intracelular, o que ocorre através da diminuição da síntese de ATP e do aumento simultâneo da hidrólise. A redução do potencial elétrico transmembrana, que é a força motriz da síntese de ATP, leva ao aumento da permeabilidade de prótons na membrana. O vazamento de íons, como potássio e fosfato, para fora da célula é um indicativo de dano à membrana, resultando em distúrbios na pressão osmótica das células (Lambert et al., 2001; Ultee; Kets; Smid, 1999; Veldhuizen et al., 2006).

Além disso, foram identificadas mudanças nas composições de ácidos graxos das membranas celulares bacterianas em concentrações subletais de diversos compostos presentes em óleos essenciais (Di Pasqua et al., 2006).

O óleo essencial de orégano, rico em carvacrol e timol, demonstra um potente efeito sinérgico contra uma ampla gama de microrganismos. Estudos indicam que a CIM (concentração inibitória mínima) para inibir o crescimento de diversas espécies de leveduras é de aproximadamente 0,2 mg/mL. Além disso, o óleo essencial de orégano exibe alta eficácia contra espécies de *Fusarium*, com CIMs inferiores a 0,8 mg/mL, e atividade antifúngica predominantemente entre 0,2 e 0,3 mg/mL. No entanto, a CIM para inibir o crescimento de bactérias ácido-láticas é significativamente maior, variando entre 5,5 e 13 mg/mL (Büşra Konuk; Ergüden, 2017; Gutierrez et al., 2008; Sharma et al., 2017a)

Essa variabilidade na CIM sugere que a atividade antimicrobiana do óleo essencial de orégano pode ser influenciada tanto pela espécie microbiana quanto pela composição química do óleo.

O carvacrol, um fenol monoterpênico, é amplamente reconhecido por sua potente atividade antimicrobiana. Estudos demonstram que o carvacrol exibe alta eficácia contra uma variedade de microrganismos, incluindo bactérias Gram-positivas como *Staphylococcus aureus* (CIM = 0,3 mg/mL) e *Streptococcus spp.* (CIM = 2,5 mg/mL), e Gram-negativas como *Escherichia coli* e *Salmonella typhimurium* (CIM < 0,25 mg/mL) (Marinelli; Di Stefano; Cacciatore, 2018; Rathod et al., 2021). Essa ampla gama de atividade antimicrobiana posiciona o carvacrol como um promissor agente natural para o controle de microrganismos em diversos contextos.

O óleo essencial de orégano demonstra uma atividade antimicrobiana mais pronunciada contra fungos patogênicos quando comparado a bactérias ácido-láticas. Estudos indicam que o óleo essencial de orégano é capaz de inibir a biossíntese de aflatoxinas, interferindo em etapas posteriores da sua produção (Chaudhari et al., 2020).

O carvacrol, por exemplo, demonstra a capacidade de inibir a biossíntese flagelar, resultando em células bacterianas aflageladas e, conseqüentemente, imóveis. Essa perda de motilidade compromete significativamente a adesão bacteriana a células epiteliais, tornando cepas potencialmente patogênicas incapazes de colonizar tecidos hospedeiros (Burt et al., 2007).

O cinamaldeído, principal componente do óleo essencial de canela, é responsável por sua acentuada atividade antimicrobiana. Diversos estudos demonstram o potencial antifúngico do cinamaldeído contra uma ampla gama de espécies fúngicas, incluindo *Candida spp.* (Choonharuangdej; Srithavaj; Thummawanit, 2021), *Aspergillus flavus* (Achar et al., 2020a), *Fusarium graminearum* (Gwiazdowska et al., 2022a) e *Aspergillus ochraceus* (Wang et al., 2018). Além disso, o cinamaldeído também exibe atividade antibacteriana contra bactérias Gram-negativas e Gram-positivas, como *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* (Zhang et al., 2016a).

Entre os diversos compostos bioativos presentes no óleo essencial de canela, o cinamaldeído destaca-se por sua potente atividade inibitória sobre a síntese de

micotoxinas, como aflatoxinas e ocratoxina. Estudos demonstram que o cinamaldeído apresenta uma concentração inibitória mínima (CIM) de 0,8 mg/mL contra fungos do gênero *Fusarium*, como *F. oxysporum* e *F. graminearum*. Além disso, o cinamaldeído também inibe o crescimento de leveduras deteriorantes, com CIM variando entre 0,31 e 1,25 mg/mL (Muñoz-González et al., 2022).

O óleo essencial de canela demonstra um amplo espectro de atividade antimicrobiana, inibindo o crescimento de diversas bactérias patogênicas, como *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* e *Listeria* spp., em concentrações relativamente baixas (0,3-0,5 mg/mL) (Nematollahi et al., 2020). Similarmente, o cinamaldeído também é eficaz contra fungos filamentosos, apresentando concentração inibitória mínima (CIM) entre 0,4 e 0,5 mg/mL para *Penicillium citrinus* e *Penicillium expandatum* (Lucas-González et al., 2023). No entanto, a CIM do óleo essencial de canela para inibir o crescimento de bactérias ácido-láticas é significativamente mais elevada, alcançando aproximadamente 10 mg/mL (de Oliveira Carvalho et al., 2020). Essa diferença na susceptibilidade sugere que a atividade antimicrobiana do óleo essencial de canela pode variar dependendo do microrganismo alvo.

A eficácia do cinamaldeído contra bactérias ácido-láticas varia consideravelmente. Estudos demonstram que a concentração inibitória mínima (CIM) necessária para inibir o crescimento de *Lactobacillus sakei* é de 5 mg/mL, enquanto para *Lactobacillus brucei* é significativamente maior, alcançando 50 mg/mL (Muñoz-González et al., 2022; Sameza et al., 2016; Sharma et al., 2017b). Essa variação na susceptibilidade indica que a atividade antimicrobiana do cinamaldeído pode ser influenciada por fatores específicos de cada espécie bacteriana.

Avaliou-se a atividade antimicrobiana *in vitro* de diversos óleos essenciais e seus componentes isolados contra cepas patogênicas de *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. e *Clostridium perfringens*. Utilizando as metodologias de micro diluição em caldo e difusão em ágar, observou-se que óleos essenciais com maior teor de compostos fenólicos demonstraram maior potência antimicrobiana, expressa pela menor CIM (Ben Arfa et al., 2006; Jugl-Chizzola et al., 2006; Peñalver et al., 2005).

Nos estudos de Dorman; Deans, (2000), citados por (Franz et al., 2010) observou-se variabilidade na atividade antimicrobiana de diferentes óleos essenciais,

influenciada tanto pela espécie vegetal e parte da planta utilizada, quanto pela sensibilidade das cepas microbianas. Essa variação foi atribuída à diversidade química dos óleos essenciais, que é influenciada por fatores como quimiotipo, morfologia e estágio de desenvolvimento da planta, frequentemente negligenciados em estudos microbiológicos e animais.

Alguns autores sugerem que a suplementação com óleos essenciais promove o aumento da secreção de muco intestinal, atuando como uma barreira protetora para as vilosidades intestinais (Jamroz et al., 2006). Além disso, a inclusão de óleos essenciais na dieta animal pode contribuir para a redução da carga microbiana da ração e a melhoria das condições higiênico-sanitárias das carcaças, conforme evidenciado em estudos anteriores (Aksit et al., 2006; Onibala; Gunther; Meulen, 2001).

No geral, a vasta maioria dos estudos contemporâneos converge para a conclusão de que o mecanismo de ação antimicrobiano dos óleos essenciais vegetais reside, primordialmente, na perturbação da integridade estrutural e funcional das células microbianas. Esse efeito é alcançado por meio de múltiplos mecanismos, incluindo a desestabilização de biofilmes, a inibição da biossíntese da parede celular, a desnaturação de proteínas de membrana e a disfunção mitocondrial.

2.3.3. Efeitos dos óleos essenciais na fermentação de silagens

Conforme relatado em diversos estudos (Cantoia Júnior et al., 2020; Chaves et al., 2012a; Faraone; Hillier; Cutler, 2015; Schmidt et al., 2015; Talita et al., 2020), óleos essenciais de plantas, quando utilizados em conjunto com outros compostos ou em revestimentos específicos, têm demonstrado eficácia no controle de processos fermentativos, conferindo ação antifúngica e bactericida, além de melhorar a estabilidade aeróbica de silagens.

Besharati, Maghsoud et al. (2021), relataram que a adição de blend de óleos essenciais (ácido ricinoleico, cardol e cardanol) na dose de 500 mg kg⁻¹ de MN melhorou a qualidade da silagem de alfafa, com melhora da estabilidade aeróbica e aumento na concentração de proteína bruta e matéria seca.

Kim; Adesogan, (2006), em estudo com de óleos essenciais isolados, indicaram que alguns compostos como o eugenol, comumente encontrados em cravo da Índia, não exercem efeitos inibitórios sobre as bactérias ácido lácticas.

Belanche et al., (2020), através de uma meta-análise, utilizando 113 artigos, destacaram benefícios da adição de blend de óleos essenciais na silagem quando avaliado o desempenho dos animais, com melhora na eficiência alimentar, digestibilidade dos nutrientes e na produção de leite. Demonstrando que a utilização de OE pode beneficiar não somente a qualidade da silagem, mas também o desempenho dos animais alimentados com ela.

Apesar dos artigos já apresentados, demonstrando os efeitos benéficos do uso de óleos essenciais em silagens, ainda há divergências entre resultados de pesquisas similares, principalmente envolvendo doses e compostos ativos.

Kung et al. (2008), apresentaram que não houve diferença entre silagens tratadas com misturas de óleos essenciais (timol, eugenol, vanilina e limoneno) em doses de 40 e 80 mg kg⁻¹ de massa fresca e silagens não tratadas, quando analisadas o número de leveduras, bolores, enterobactérias e bactérias ácido lácticas. Já Chaves et al. (2012) demonstraram que a adição de óleos essenciais (125, 200 e 400 mg kg⁻¹ de MN) em silagens de cevada foi eficaz em inibir o crescimento de leveduras após a abertura do silo, retardando a deterioração aeróbia.

Porém, deve-se considerar que a aplicação em silagens apresenta efeito dilutivo dos óleos essenciais, ou seja, usa-se pouca concentração de óleos essenciais para homogeneizar com o grande volume da massa de forragem ensilada.

2.3.4. Efeitos na estabilidade aeróbia

Microrganismos como leveduras e fungos promovem a deterioração aeróbia das silagens, agindo principalmente pela degradação do ácido láctico produzido durante a fermentação, promovendo a elevação do pH durante a exposição ao ar (McDonald et al., 1991).

Segundo Pereira (2018) o uso de óleos essenciais de timol e carvacrol melhoraram a estabilidade aeróbia em silagens de milho e de cana-de-açúcar, apesar de provocarem leve redução na fermentação ácido láctica. A adição do óleo essencial

de timol na dose de 600 mg kg⁻¹ de forragem fresca à silagem de milho revelou efeitos benéficos sobre a qualidade do produto final.

A aditivação da silagem com óleos essenciais de cominho (Turan; Önenç, 2018a), canela, orégano e laranja doce (Chaves et al., 2012b) demonstrou ser eficaz na redução das contagens de fungos e leveduras, após a abertura dos silos.

A adição de óleos essenciais de canela, laranja doce, orégano e tomilho em silagem, na dose de 120 mg kg⁻¹ de matéria verde promoveu significativa extensão do período de estabilidade aeróbica, alcançando 2 semanas. Em contraste, o grupo controle, sem a adição de óleos essenciais, apresentou estabilidade aeróbica por apenas 72 horas (Chaves et al., 2008).

REFERÊNCIAS

- ACHAR, Premila Narayana et al. Investigation of the Antifungal and Anti-Aflatoxigenic Potential of Plant-Based Essential Oils against *Aspergillus flavus* in Peanuts. **Journal of Fungi**, [s. l.], vol. 6, no. 4, p. 383, 2020.
- ADESOGAN, A. T. Challenges of tropical silage production. 2009, Madison, WI, EUA (University of Wisconsin). **15th International Silage Conference**. Madison, WI, EUA (University of Wisconsin): University of Wisconsin, 2009. pp. 139–154.
- AKSIT, M et al. The impacts of organic acid and essential oil supplementations to diets on the microbiological quality of chicken carcasses. **Archiv fur Geflugelkunde**, [s. l.], vol. 70, no. 4, pp. 168–173, 2006.
- BELANCHE, Alejandro et al. A Meta-analysis Describing the Effects of the Essential oils Blend Agolin Ruminant on Performance, Rumen Fermentation and Methane Emissions in Dairy Cows. **Animals**, [s. l.], vol. 10, no. 4, p. 620, 2020.
- BEN ARFA, A. et al. Antimicrobial activity of carvacrol related to its chemical structure. **Letters in Applied Microbiology**, [s. l.], vol. 43, no. 2, pp. 149–154, 2006.
- BERNARDES, T. F. Advances in Silage Sealing. *In*: ADVANCES IN SILAGE PRODUCTION AND UTILIZATION. [S. l.]: InTech, 2016.
- BERNARDES, T.F.; DO RÊGO, A.C. Study on the practices of silage production and utilization on Brazilian dairy farms. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], vol. 97, no. 3, pp. 1852–1861, 2014.
- BESHARATI, Maghsoud et al. Optimization of dietary lemon seed essential oil to enhance alfalfa silage chemical composition and in vitro degradability. **Semina: Ciências Agrárias**, [s. l.], vol. 42, no. 2, pp. 891–906, 2021.
- BORREANI, G. et al. Silage review: Factors affecting dry matter and quality losses in silages. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], vol. 101, no. 5, pp. 3952–3979, 2018. Disponível em: <https://www.journalofdairyscience.org/action/showFullText?pii=S0022030218303205>.
- BORREANI, G. et al. Silage review: Factors affecting dry matter and quality losses in silages. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], vol. 101, no. 5, pp. 3952–3979, 2018. Disponível em: Acesso at: 17 Nov. 2025.
- BORREANI, G.; TABACCO, E. The relationship of silage temperature with the microbiological status of the face of corn silage bunkers. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], vol. 93, no. 6, pp. 2620–2629, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030210002663>.
- BRAZIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 13, de 30 de novembro de 2004: Regulamento Técnico sobre Aditivos para Produtos Destinados à Alimentação Animal**. Brasília: [s. d.], 2004.

BRÜNING, D. et al. Effect of compaction, delayed sealing and aerobic exposure on maize silage quality and on formation of volatile organic compounds. **Grass and Forage Science**, [s. l.], vol. 73, no. 1, pp. 53–66, 2017. Disponível em: Acesso at: 17 Nov. 2025.

BRÜNING, D. et al. Effect of compaction, delayed sealing and aerobic exposure on maize silage quality and on formation of volatile organic compounds. **Grass and Forage Science**, [s. l.], vol. 73, no. 1, pp. 53–66, 2018.

BUENO, J. L. et al. Maturity interacts with length of storage to affect ruminal disappearance of starch in mechanically unprocessed corn silage. 2017, Piracicaba, São Paulo, Brasil. (L. G. Nussio et al., Eds.) **V International Symposium on Forage Quality and Conservation**. Piracicaba, São Paulo, Brasil.: [s. d.], 2017.

BURT, Sara A. et al. Carvacrol Induces Heat Shock Protein 60 and Inhibits Synthesis of Flagellin in *Escherichia coli* O157:H7. **Applied and Environmental Microbiology**, [s. l.], vol. 73, no. 14, pp. 4484–4490, 2007.

BURT, Sara. Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods—a review. **International Journal of Food Microbiology**, [s. l.], vol. 94, no. 3, pp. 223–253, 2004.

BÜŞRA KONUK, Hatice; ERGÜDEN, Bengü. Antifungal activity of various essential oils against *Saccharomyces cerevisiae* depends on disruption of cell membrane integrity. **BIOCELL**, [s. l.], vol. 41, no. 1, pp. 13–18, 2017.

CANTOIA JÚNIOR, Roberto et al. Lemongrass essential oil in sugarcane silage: Fermentative profile, losses, chemical composition, and aerobic stability. **Animal Feed Science and Technology**, [s. l.], vol. 260, p. 114371, 2020.

CHAO, Sue C.; YOUNG, D. Gary; OBERG, Craig J. Screening for Inhibitory Activity of Essential Oils on Selected Bacteria, Fungi and Viruses. **Journal of Essential Oil Research**, [s. l.], vol. 12, no. 5, pp. 639–649, 2000.

CHAUDHARI, Anand Kumar et al. Improvement of in vitro and in situ antifungal, AFB1 inhibitory and antioxidant activity of *Origanum majorana* L. essential oil through nanoemulsion and recommending as novel food preservative. **Food and Chemical Toxicology**, [s. l.], vol. 143, p. 111536, 2020.

CHAVES, A V et al. Effect of essential oils used as inoculants on the nutritive value of barley silage. **Multifunctional Grasslands in a Changing World**, [s. l.], vol. 2, pp. 654–654, 2008. Disponível em: Acesso at: 6 Dec. 2025.

CHAVES, Alexandre V et al. Effects of cinnamon leaf, oregano and sweet orange essential oils on fermentation and aerobic stability of barley silage. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], vol. 92, no. 4, pp. 906–915, 2012a.

CHAVES, Alexandre V et al. Effects of cinnamon leaf, oregano and sweet orange essential oils on fermentation and aerobic stability of barley silage. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], vol. 92, no. 4, pp. 906–915, 2012b.

CHOONHARUANGDEJ, Suwan; SRITHAVAJ, Theerathavaj; THUMMAWANIT, Supanut. Fungicidal and inhibitory efficacy of cinnamon and lemongrass essential oils on *Candida albicans* biofilm established on acrylic resin: An in vitro study. **The Journal of Prosthetic Dentistry**, [s. l.], vol. 125, no. 4, pp. 707.e1-707.e6, 2021.

CONAB. **ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA GRÃOS SAFRA 2023/24**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/12o-levantamento-safra-2023-2024/boletim-da-safra-de-graos>. .

COURTIN, M. G.; SPOELSTRA, S. F. A simulation model of the microbiological and chemical changes accompanying the initial stage of aerobic deterioration of silage. **Grass and Forage Science**, [s. l.], vol. 45, no. 2, pp. 153–165, 1990.

DANIEL, J. L. P.; JUNGES, D.; NUSSIO, L. G. A meta-analysis of the effects of length of storage on starch digestibility and aerobic stability of corn silages. 2015, Piracicaba, São Paulo, Brasil. **XVII International Silage Conference**. Piracicaba, São Paulo, Brasil.: Multipress, 2015. pp. 306–307.

DE OLIVEIRA CARVALHO, Isabela et al. In vitro anticariogenic and antibiofilm activities of toothpastes formulated with essential oils. **Archives of Oral Biology**, [s. l.], vol. 117, p. 104834, 2020.

DE SOUSA, Pamela Grossi. **VALOR NUTRITIVO, ESTABILIDADE AERÓBICA E CONTAGENS MICROBIOLÓGICAS EM SILAGEM DE MILHO ENSILADAS EM ATÉ 24 HORAS APÓS COLHEITA**. 2020. - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte - MG, 2020.

DI PASQUA, Rosangela et al. Changes in Membrane Fatty Acids Composition of Microbial Cells Induced by Addition of Thymol, Carvacrol, Limonene, Cinnamaldehyde, and Eugenol in the Growing Media. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], vol. 54, no. 7, pp. 2745–2749, 2006.

DORMAN, H. J. D.; DEANS, S. G. Antimicrobial agents from plants: antibacterial activity of plant volatile oils. **Journal of Applied Microbiology**, [s. l.], vol. 88, no. 2, pp. 308–316, 2000.

EVANGELISTA, Alberto Gonçalves et al. The impact of essential oils on antibiotic use in animal production regarding antimicrobial resistance – a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], vol. 62, no. 19, pp. 5267–5283, 2022.

FARAONE, Nicoletta; HILLIER, N. Kirk; CUTLER, G. Christopher. Plant Essential Oils Synergize and Antagonize Toxicity of Different Conventional Insecticides against *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae). **PLOS ONE**, [s. l.], vol. 10, no. 5, p. e0127774, 2015.

FERNANDES, G. F.; EVANGELISTA, A. F.; BORGES, L. S. Potencial de espécies forrageiras para produção de silagem: revisão de literatura. **Revista Eletrônica Nutri**

Time, [s. l.], vol. 13, no. 3, pp. 4652–4656, 2016. Disponível em: <https://nutritime.com.br/wp-content/uploads/2020/02/Artigo-373.pdf>.

FONTANELI, R. S.; FONTANELI, R. S. Qualidade de forragem. *In*: FORRAGEIRAS PARA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA REGIÃO SUL-BRASILEIRA. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. pp. 25–31.

FRANZ, C et al. Essential oils and aromatic plants in animal feeding-a European perspective. A review. †,#. [s. l.], vol. 25, pp. 327–340, 2010. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ffj.1967>.

GALLO, A. et al. New assessment based on the use of principal factor analysis to investigate corn silage quality from nutritional traits, fermentation end products and mycotoxins. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], vol. 96, no. 2, pp. 437–448, 2016.

GUTIERREZ, Jorge et al. Efficacy of Plant Essential Oils against Foodborne Pathogens and Spoilage Bacteria Associated with Ready-to-Eat Vegetables: Antimicrobial and Sensory Screening. **Journal of Food Protection**, [s. l.], vol. 71, no. 9, pp. 1846–1854, 2008.

GWIAZDOWSKA, Daniela et al. The Concentration-Dependent Effects of Essential Oils on the Growth of *Fusarium graminearum* and Mycotoxins Biosynthesis in Wheat and Maize Grain. **Applied Sciences**, [s. l.], vol. 12, no. 1, p. 473, 2022.

HENTZ, F. et al. Fractionation of carbohydrates and nitrogenous constituents of late-crop corn silages ensiled with different specific masses. **Semina: Ciências Agrárias**, [s. l.], vol. 38, no. 1, p. 491, 2017.

HOEDTKE, S.; GABEL, M.; ZEYNER, A. Der Proteinabbau im Futter während der Silierung und Veränderungen der Zusammensetzung der Rohproteinfraktion. [s. l.], 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/288383899_Der_Proteinabbau_im_Futter_waehrend_der_Silierung_und_Veranderungen_der_Zusammensetzung_der_Rohproteinfraktion.

IBGE. **PAM 2023: Safra bate recorde, mas valor da produção cai | Agência de Notícias**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/41296-pam-2023-safra-bate-recorde-mas-valor-da-producao-cai>.

JAMROZ, D. et al. Influence of diet type on the inclusion of plant origin active substances on morphological and histochemical characteristics of the stomach and jejunum walls in chicken. **Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition**, [s. l.], vol. 90, no. 5–6, pp. 255–268, 2006.

JOBIM, C. C. et al. Sistemas de produção de leite com ênfase na utilização de volumosos conservados. *In*: REIS, R. A.; OUTROS; OUTROS (eds.). **Volumosos na produção de ruminantes**. 1. ed. Jaboticabal: Funep, 2005. pp. 31–82.

JOBIM, C. C.; NUSSIO, L. G. Princípios básicos da fermentação na ensilagem. *In*: REIS, R. A.; BERNARDES, T. F.; SIQUEIRA, G. R. (eds.). **Forragicultura: ciência, tecnologia e gestão de recursos forrageiros**. Jaboticabal, São Paulo, Brasil.: Multipress, 2013. pp. 649–660.

JUGL-CHIZZOLA, Martina et al. Testing of the palatability of *Thymus vulgaris* L. and *Origanum vulgare* L. as flavouring feed additive for weaner pigs on the basis of a choice experiment. **Berliner und Munchener tierarztliche Wochenschrift**, [s. l.], vol. 119, no. 5–6, pp. 238–43, 2006.

KANT, Ravi; KUMAR, Anil. Review on essential oil extraction from aromatic and medicinal plants: Techniques, performance and economic analysis. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, [s. l.], vol. 30, p. 100829, 2022.

KHAN, Nazir A et al. Nutritive value of maize silage in relation to dairy cow performance and milk quality. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], vol. 95, no. 2, pp. 238–252, 2015.

KIM, S. C.; ADESOGAN, A. T. Influence of ensiling temperature, simulated rainfall, and delayed sealing on fermentation characteristics and aerobic stability of corn silage. **Journal of dairy science**, [s. l.], vol. 89, no. 8, pp. 3122–3132, 2006. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16840629/>.

KLEINSCHMIT, D.H.; SCHMIDT, R.J.; KUNG, L. The Effects of Various Antifungal Additives on the Fermentation and Aerobic Stability of Corn Silage. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], vol. 88, no. 6, pp. 2130–2139, 2005.

KRÜGER, A. M. et al. A simple method for determining maize silage density on farms. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, [s. l.], vol. 5, no. 2, p. 94, 2017.

KUNG, L. et al. A blend of essential plant oils used as an additive to alter silage fermentation or used as a feed additive for lactating dairy cows. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], vol. 91, no. 12, pp. 4793–4800, 2008.

KUNG JR., L. **A REVIEW ON SILAGE ADDITIVES AND ENZYMES**. [S. l.], 1998. Disponível em: <https://cdn.canr.udel.edu/wp-content/uploads/2014/02/A-REVIEW-ON-SILAGE-ADDITIVES-AND-ENZYMES.pdf>. .

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**, [s. l.], vol. 91, no. 3, pp. 453–462, 2001.

LINDGREN, S.; PAHLOW, G.; OLDENBURG, E. Influence of microbes and their metabolites on feed and food quality. 2002, La Rochelle, França. **9th General Meeting of the European Grassland Federation**. La Rochelle, França.: [s. d.], 2002. pp. 503–511.

LIU, Beiyi et al. Impact of molasses and microbial inoculants on fermentation quality, aerobic stability, and bacterial and fungal microbiomes of barley silage. **Scientific Reports**, [s. l.], vol. 10, no. 1, p. 5342, 2020.

LUCAS-GONZÁLEZ, Raquel et al. Cinnamon: An antimicrobial ingredient for active packaging. **Food Packaging and Shelf Life**, [s. l.], vol. 35, p. 101026, 2023.

MARINELLI, Lisa; DI STEFANO, Antonio; CACCIATORE, Ivana. Carvacrol and its derivatives as antibacterial agents. **Phytochemistry Reviews**, [s. l.], vol. 17, no. 4, pp. 903–921, 2018.

MC DONALD, P. et al. **The Biochemistry of Silage (Second Edition)**. . 2. ed. Marlow, Bucks, UK: Cambridge University Press, 1991-. ISSN 1469-4441. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/experimental-agriculture/article/abs/biochemistry-of-silage-second-edition-by-p-mcdonald-a-r-henderson-and-s-j-e-hearn-marlow-bucks-uk-chalcombe-publications-1991-pp-340-4950-isbn-0948617225/0831B522BF294AE69335B67D9B4A1248>.

MCALLISTER, T. A.; HRISTOV, A. N. The Fundamentals of Making Good Quality Silage Take Home Messages. **Advances in Dairy Technology**, [s. l.], vol. 12, p. 381, 2000. Disponível em: Acesso at: 17 Nov. 2025.

MCDONALD, P. The biochemistry of silage. **New York: John Wiley**, [s. l.], p. 207, 1981.

MILLS, J. A.; KUNG, L. The Effect of Delayed Ensiling and Application of a Propionic Acid-Based Additive on the Fermentation of Barley Silage,. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], vol. 85, no. 8, pp. 1969–1975, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030202742732>.

MORAN, J. P. et al. A comparison of two methods for the evaluation of the aerobic stability of whole crop wheat silage. 1996, University of Wales Aberystwyth. **The 11th International Silage Conference, held in Aberystwyth in 1996**. University of Wales Aberystwyth: University of Wales Aberystwyth, 1996. pp. 162–163.

MUÑOZ-GONZÁLEZ, Rodrigo et al. Elucidation of antimicrobial and antioxidant activities of selected plant-based mayonnaise-derived essential oils against lactic acid bacteria. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s. l.], vol. 46, no. 3, 2022.

NEMATOLLAHI, Zohreh et al. The Antibacterial Activity of Cinnamon Essential Oil against Foodborne Bacteria: A Mini-Review. **Journal of Human, Environment, and Health Promotion**, [s. l.], vol. 6, no. 3, pp. 101–105, 2020.

NUSSIO, L. G.; CAMPOS, F. P. de; DIAS, F. N. IMPORTÂNCIA DA QUALIDADE DA PORÇÃO VEGETATIVA NO VALOR ALIMENTÍCIO DA SILAGEM DE MILHO. [s. l.], 2001. Disponível em: <http://www.nupel.uem.br/Silagens-de-milho-qualidade.pdf>.

OLIVEIRA, C. A.; MILLEN, D. D. Survey of the nutritional recommendations and management practices adopted by feedlot cattle nutritionists in Brazil. **Animal Feed Science and Technology**, [s. l.], vol. 197, pp. 64–75, 2014.

ONIBALA, J. S. I. T.; GUNTHER, K. D.; MEULEN, U. T. Sustainable development in the context of globalization and locality: challenges and options for networking in

Southeast Asia. **Proc. South East Asia Germany Alurnni Network Conf.: Kassel, Germany.**, [s. l.], 2001.

PAHLOW, G. et al. Microbiology of Ensiling. *In*: [S. l.]: [s. d.], 2003. pp. 31–93.

PEÑALVER, PEDRO et al. Antimicrobial activity of five essential oils against origin strains of the *Enterobacteriaceae* family. **APMIS**, [s. l.], vol. 113, no. 1, pp. 1–6, 2005.

PEREIRA, L. M. **Use of essential oils as additives for corn and sugarcane silages.** 2018. - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

PINTO, A.C.J.; MILLEN, D. D. Nutritional recommendations and management practices adopted by feedlot cattle nutritionists: the 2016 Brazilian survey. **Animal Production Science**, [s. l.], vol. 58, no. 9, pp. 1647–1657, 2018.

RATHOD, Nikheel Bhojraj et al. Biological activity of plant-based carvacrol and thymol and their impact on human health and food quality. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], vol. 116, pp. 733–748, 2021.

RAUN, B. M. L.; KRISTENSEN, N. B. Propanol in maize silage at Danish dairy farms. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section A - Animal Science**, [s. l.], vol. 60, no. 1, pp. 53–59, 2010.

ROTZ, C. A.; MUCK, R. E. Changes in forage quality during harvest and storage. *In*: GEORGE C.; FAHEY JR. (eds.). **Forage quality, evaluation, and utilization.** Madison, WI: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America., 1994. pp. 828–868.

SAMEZA, Modeste Lambert et al. Evaluation of Clove Essential Oil as a Mycobiocide Against *Rhizopus stolonifer* and *Fusarium solani* , Tuber Rot Causing Fungi in Yam (*Dioscorea rotundata* Poir.). **Journal of Phytopathology**, [s. l.], vol. 164, no. 7–8, pp. 433–440, 2016.

SCHMIDT, P. et al. Concentration of mycotoxins and chemical composition of corn silage: A farm survey using infrared thermography. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], vol. 98, no. 9, pp. 6609–6619, 2015.

SHARMA, Abhishek et al. Antifungal activities of selected essential oils against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* 1322, with emphasis on *Syzygium aromaticum* essential oil. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, [s. l.], vol. 123, no. 3, pp. 308–313, 2017a.

SHARMA, Abhishek et al. Antifungal activities of selected essential oils against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* 1322, with emphasis on *Syzygium aromaticum* essential oil. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, [s. l.], vol. 123, no. 3, pp. 308–313, 2017b.

SMITH-PALMER; STEWART; FYFE. Antimicrobial properties of plant essential oils and essences against five important food-borne pathogens. **Letters in Applied Microbiology**, [s. l.], vol. 26, no. 2, pp. 118–122, 1998.

TALITA, Pereira de Souza Ferreira et al. Control of papaya fruits anthracnose by essential oils of medicinal plants associated to different coatings. **Journal of Medicinal Plants Research**, [s. l.], vol. 14, no. 6, pp. 239–246, 2020.

TOMIC, T. R. et al. **Características químicas para avaliação do processo fermentativo de silagens: uma proposta para qualificação da fermentação**. Corumbá: [s. d.], 2003. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/811112/1/DOC57.pdf>. .

TURAN, Aslı; ÖNENÇ, Sibel Soykan. Effect of cumin essential oil usage on fermentation quality, aerobic stability and in vitro digestibility of alfalfa silage. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, [s. l.], vol. 31, no. 8, pp. 1252–1258, 2018.

ULTEE, A.; KETS, E. P. W.; SMID, E. J. Mechanisms of Action of Carvacrol on the Food-Borne Pathogen *Bacillus cereus*. **Applied and Environmental Microbiology**, [s. l.], vol. 65, no. 10, pp. 4606–4610, 1999.

VELDHUIZEN, Edwin J. A. et al. Structural Requirements for the Antimicrobial Activity of Carvacrol. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], vol. 54, no. 5, pp. 1874–1879, 2006.

WANG, Limin et al. Effect of Cinnamaldehyde on Morphological Alterations of *Aspergillus ochraceus* and Expression of Key Genes Involved in Ochratoxin A Biosynthesis. **Toxins**, [s. l.], vol. 10, no. 9, p. 340, 2018.

WEISS, K.; KROSCHEWSKI, B.; AUERBACH, H. Effects of air exposure, temperature and additives on fermentation characteristics, yeast count, aerobic stability and volatile organic compounds in corn silage. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], vol. 99, no. 10, pp. 8053–8069, 2016.

ZHANG, Yunbin et al. Antibacterial activity and mechanism of cinnamon essential oil against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. **Food Control**, [s. l.], vol. 59, pp. 282–289, 2016.

CAPÍTULO 2 – QUALIDADE FERMENTATIVA, COMPOSIÇÃO NUTRICIONAL ESTABILIDADE AERÓBIA DE SILAGENS DE MILHO COM DIFERENTES DOSES DE ÓLEOS ESSENCIAIS

Resumo: O objetivo deste trabalho foi investigar os efeitos de um blend de óleos essenciais (75% carvacrol e 25% cinamaldeído) sobre as perdas fermentativas, a composição químico-bromatológica e a estabilidade aeróbia de silagens de milho (*Zea mays* L., cv. BRS 2223). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com cinco repetições por tratamento. As doses testadas foram 0, 200, 400, 600 e 800 mg kg⁻¹ de matéria verde, aplicadas imediatamente antes da ensilagem, utilizando-se silos laboratoriais mantidos vedados por 60 dias. As análises realizadas abrangeram: composição química (matéria seca, matéria orgânica, proteína bruta, extrato etéreo, frações fibrosas, carboidratos totais e digestibilidade in vitro), perdas (gases, efluentes e matéria orgânica), perfil fermentativo (ácido láctico, ácido acético, ácido butírico, acetato de etila, etanol e ácido propiônico) e estabilidade aeróbia (monitoramento da temperatura e do pH ao longo de 177 horas). Os resultados evidenciaram efeitos quadráticos significativos para os teores de matéria seca (valor máximo de 34,5% na dose de 200 mg kg⁻¹), matéria orgânica (94,5%, também aos 200 mg kg⁻¹), carboidratos totais (77,5% aos 400 mg kg⁻¹) e fração A+B1 (55% aos 400 mg kg⁻¹). Observou-se redução linear da proteína bruta (atingindo 7,08% na maior dose) e aumento linear do extrato etéreo (máximo de 3,73% aos 800 mg kg⁻¹), sugerindo uma relação inversa entre esses componentes, possivelmente associada à ação antimicrobiana do blend, que inibe a degradação proteica e favorece a retenção de lipídeos. As perdas por gases e por efluentes foram minimizadas na dose de 400 mg kg⁻¹, com redução de 42% em relação ao controle, não havendo diferenças significativas na recuperação de matéria seca. No perfil fermentativo, detectaram-se respostas quadráticas para etanol (pico de 0,23 mg kg⁻¹ aos 600 mg kg⁻¹), acetato de etila (máximo também aos 600 mg kg⁻¹) e ácido propiônico (valor mínimo aos 400 mg kg⁻¹). O ácido láctico apresentou valor numérico máximo de 6,86% aos 200 mg kg⁻¹, porém sem significância estatística. Os teores de ácido acético, ácido butírico, acetona e metanol não foram influenciados pelos tratamentos, indicando modulação seletiva da fermentação anaeróbia. Quanto à estabilidade aeróbia, todas as doses contendo o blend impediram o aquecimento da massa ensilada, mantendo as temperaturas até 2°C abaixo do ambiente, ao passo que o controle apresentou elevação térmica. Conclui-se, portanto, que o blend de óleos essenciais exerce efeito positivo sobre a fermentação, reduz perdas e melhora a conservação da silagem de milho, sendo as doses entre 200 e 400 mg kg⁻¹ as mais indicadas para otimizar a eficiência fermentativa, a preservação nutricional e a estabilidade aeróbia em condições tropicais, contribuindo para a sustentabilidade da produção de silagem.

Palavras-chave: Aditivos, carvacrol, cinamaldeído, estabilidade aeróbia, fermentação.

INTRODUÇÃO

A bovinocultura brasileira é baseada em sistema extensivo, utilizando como base alimentar gramíneas tropicais. Devido ao sistema adotado, enfrenta o desafio sazonal da baixa disponibilidade de forragem durante o período de seca (inverno), caracterizado por reduzida pluviosidade e temperaturas que podem cair abaixo da mínima crítica ($\sim 11^{\circ}\text{C}$), este período compromete a produtividade (Pequeno et al., 2015). Como estratégia para mitigar esse entrave, a ensilagem surge como uma técnica fundamental para assegurar a alimentação do rebanho.

Na região do Cerrado, a silagem de milho é a mais utilizada, representando cerca de 80% da produção nacional (Bernardes; Do Rêgo, 2014), sendo a cultura comumente empregada para essa finalidade. Sua predominância deve-se ao excelente valor nutricional, alta produtividade e elevado teor energético (Costa et al., 2017). Contudo, a qualidade final da silagem é frequentemente comprometida por perdas fermentativas e deterioração aeróbia, problemas que impactam diretamente o valor nutritivo e a economia da produção (Borreani et al., 2018b). Nesse contexto, a utilização de aditivos naturais tem sido investigada para melhorar o processo de fermentação e a estabilidade pós-abertura do silo, alinhando-se à crescente demanda por tecnologias sustentáveis (Bach et al., 2023).

Os óleos essenciais (OE), metabólitos secundários de plantas, emergem como candidatos promissores. Eles possuem uma ampla gama de atividades biológicas, incluindo ação antibacteriana, antifúngica e antioxidante (Gupta; Jeyakumar; Lawrence, 2021). Sua aplicação na ensilagem visa modular a população microbiana, suprimindo bactérias indesejáveis e favorecendo as BAL (bactérias ácido lácticas), o que resulta em um padrão fermentativo superior: maior produção de ácido láctico, queda mais rápida do pH e redução de proteólise, evidenciada por menores teores de nitrogênio amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$) (Amaral, et al., 2025a; De Andrade et al., 2024).

Dentre os OE, o carvacrol (presente no orégano) e o cinamaldeído (presente na canela) destacam-se por suas potentes propriedades antimicrobianas. O carvacrol, um fenol monoterpênico (monoterpeno C_{10} contendo grupo fenólico – OH), demonstra alta eficácia contra uma variedade de bactérias Gram-positivas e Gram-negativas (Büşra Konuk; Ergüden, 2017; Gutierrez et al., 2008). Já o cinamaldeído exibe notável atividade antifúngica contra espécies como *Aspergillus flavus* (Achar et

al., 2020b) e *Fusarium graminearum* (Gwiazdowska et al., 2022b), além de ação antibacteriana (Zhang et al., 2016b).

A estabilidade aeróbia, capacidade da silagem de resistir à deterioração após a abertura do silo, é um parâmetro crucial, pois sua perda leva ao aquecimento, à produção de micotoxinas e à redução da palatabilidade (Wilkinson; Davies, 2013). Estudos indicam que a adição de OE, como o timol (Pereira, L. de M., 2018) e o óleo de orégano (Hodjatpanah-Montazeri et al., 2010), pode melhorar significativamente esse atributo. Pereira, L. de M., (2018), em estudo com timol (600 mg kg⁻¹ de material fresco) e carvacrol (400 mg kg⁻¹ de material fresco) isolados e combinados, obteve resultados positivos para preservação do teor de carboidratos solúveis, redução de perdas de matéria seca e aumento na estabilidade aeróbica na silagem de cana-de-açúcar, porém, na silagem de milho, não houve efeito na estabilidade.

Com base na literatura científica consultada, constata-se que, embora os óleos essenciais surjam como aditivos fitogênicos promissores para a modulação da fermentação e melhoria da estabilidade aeróbia de silagens, a literatura científica ainda carece de definições conclusivas sobre a dosagem ideal para aplicação prática. Esta carência pode ser decorrente da grande variabilidade química intrínseca aos OE, influenciada por fatores como espécie vegetal, quimiotipo e método de extração, somada às condições ambientais distintas entre os estudos e aos efeitos sinérgicos ou antagônicos em misturas (*blends*), o que resulta em dados por vezes contraditórios e limita a extrapolação de resultados para diferentes contextos produtivos, especialmente nas condições tropicais do Cerrado brasileiro.

A hipótese deste estudo é que a adição do blend de carvacrol e cinamaldeído à silagem de milho modula positivamente a fermentação e reduz as perdas de forma dose-dependente.

Diante da complementaridade das ações antimicrobianas do carvacrol e do cinamaldeído, este estudo teve como objetivo avaliar silagens de milho aditivadas ou não com diferentes concentrações de uma mistura (blend) de óleos essenciais (carvacrol 75% e cinamaldeído 25%), sobre os parâmetros de estabilidade aeróbica, perdas e composição nutricional.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental e tratamentos

O estudo foi conduzido na área experimental do Setor de Zootecnia da Faculdade de Ciências Agrárias – Universidade Federal da Grande Dourados, localizada no município de Dourados, MS (latitude: 22°14'16" S, longitude: 54°49'2" W e altitude de 450 m). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférico (IBGE, 2024). O clima da região é do tipo Cfa, Cwa e Aw (Köppen; Geiger, 1928), com temperatura média de 21°C, atingindo valores máximos e mínimos de 28°C e 16°C, respectivamente, umidade relativa (UR) de 70% e precipitação média anual de 1.400 mm (Schneider; Silva, 2014).

O híbrido de milho utilizado para a confecção das silagens foi o BRS 2223, é um híbrido duplo desenvolvido pela Embrapa, com ciclo superprecoce, porte baixo e boa adaptação a climas tropicais, sendo recomendada para sistemas de produção que visam tanto grãos quanto produção de volumoso.

O milho foi plantado em março de 2024 numa área de 100 m² (10 x 10 m). O plantio foi realizado em linhas espaçadas em 0,4 m, com uso de uma semeadora-adubadora equipada com facão para deposição do adubo e disco duplo defasado para a distribuição das sementes. A densidade utilizada foi de 75 mil plantas ha⁻¹ para o milho (3 plantas m⁻¹ linear). Após trinta dias do plantio, quando necessário, foi realizada a capina manual das parcelas.

Quando o milho atingiu o ponto de colheita (grão leitoso-pastoso), o que ocorreu após cerca de 90 dias pós semeadura, realizou-se a colheita mecânica (15 cm do solo) e a trituração da forragem produzida (tamanho de partículas entre 1,5 e 2 cm). O experimento foi realizado em um delineamento inteiramente casualizado, com cinco níveis de adição do blend de óleos essenciais (0, 200, 400, 600 e 800 mg kg⁻¹ de massa de forragem verde - MFMV) e cinco repetições cada. A aplicação de cada uma das doses de OE foi realizada, primariamente, em uma pequena quantidade de massa de forragem (250g) e esta foi, em seguida, misturada ao restante do material, de forma uniforme e homogênea, garantindo a distribuição dos OE em toda a massa de forragem a ser ensilada.

Após a preparação das forragens para ensilagem, foram realizadas três amostragens em cada tratamento, e as amostras foram encaminhadas ao laboratório

para determinação posterior da composição químico-bromatológica e pH das forragens no momento da ensilagem.

Para a ensilagem, utilizaram-se silos laboratoriais de polietileno (30 cm de diâmetro x 40 cm de altura) com tampa com válvula de Bunsen, para permitir o escape dos gases. No fundo dos silos foi colocada areia seca (2 kg) separada por tela e um tecido de náilon, para quantificação do efluente produzido. Após o material estar pronto (milho devidamente aditivado), procedeu-se ao enchimento e compactação da forragem. A compactação do material picado foi realizada com bastões de madeira, objetivando atingir densidade de 650 kg m^{-3} de MV.

O volume de cada silo experimental foi calculado descontando-se o espaço ocupado pela areia e pesando-se a quantidade de forragem necessária para obtenção da densidade desejada. Após a compactação da forragem, os silos foram vedados com fita adesiva, pesados e armazenados em galpão fechado sem controle das variáveis ambientais. Foram realizadas cinco repetições (cinco silos) em cada parcela.

Todas as análises laboratoriais de composição nutricional foram realizadas no laboratório de Forragicultura (TPA e Bioquímica Agropecuária) e no laboratório de Nutrição Animal. As análises de ácidos orgânicos foram analisadas nos laboratórios da ESALQ.

3.2. Avaliação de perdas e estabilidade aeróbia

Decorridos 60 dias da ensilagem, os silos foram pesados para determinação das perdas por gases. Em seguida, os silos foram abertos, sendo retirada e desprezada a camada superior quando apresentava deterioração evidente. Durante a descarga do silo, foram coletadas cinco amostras para cada tratamento. Essas amostras foram encaminhadas ao laboratório para posterior determinação da composição químico-bromatológica e pH das silagens. Após a descarga do silo, o conjunto silo, areia, tela e tecido de náilon foi pesado para quantificar as perdas por efluentes.

A determinação das perdas por gases foi calculada pela fórmula:

$$PG = [(PSi - PSf)/(PSi)] \times 100$$

Onde: PG = perdas por gases (% da MS inicial); PSi = peso do silo inicial (kg); PSf = peso do silo final (kg).

Para determinação das perdas por efluentes utilizou-se a equação proposta por Schmidt, (2006):

$$E = (Pab - Pen) / MVfe \times 1000$$

Onde: E = Produção de efluente (% da MS inicial); Pab = Peso do conjunto (silo+areia+tecido+tela) na abertura (kg); Pen = Peso do conjunto (silo+areia+tecido+tela) na ensilagem (kg) e MVfe = Massa verde de forragem ensilada (kg).

A estabilidade aeróbica foi determinada em todos os silos imediatamente após a abertura. Para isso, amostras de aproximadamente $2 \pm 0,005$ kg de cada repetição de cada tratamento foram dispostas livremente em silos experimentais limpos, com termômetros tipo espeto inseridos no centro geométrico das massas de silagem. Uma camada dupla de gaze foi colocada sobre cada silo para evitar ressecamento e contaminação, permitindo, simultaneamente, a penetração de ar. A estabilidade foi avaliada durante uma semana por meio da medição da temperatura (ambiente e da silagem) e dos valores de pH. As temperaturas foram registradas duas vezes ao dia (8h00 e 17h00) com termômetro digital, enquanto os valores de pH do extrato aquoso das silagens foram verificados uma vez por dia (17h00) pelo método do potenciômetro (Kung et al., 1984).

A recuperação de matéria seca (RMS) foi determinada segundo a metodologia descrita por Jobim et al. (2007), utilizando a seguinte equação:

$$RMS = (MFab \times MSab) / (MFfe \times MSfe) \times 100$$

Em que: RMS = índice de recuperação de matéria seca; MFab = massa de forragem na abertura; MSab = teor de MS na abertura; MFfe = massa de forragem no fechamento; Msfe = teor de MS da forragem no fechamento.

3.3. Avaliação da composição nutricional

No laboratório, as amostras foram submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 55°C por 72 h, e, após, moídas a 1 mm, em moinho de

facas tipo Willey, para determinação dos teores de MS, PB, extrato etéreo (EE) e matéria orgânica (MO), segundo métodos descritos por Silva & Queiroz (2002).

A determinação da FDN e FDA, e lignina foi obtida de acordo com Van Soest; Robertson; Lewis, (1991). Os valores de carboidratos totais (CHT) foram calculados pela equação $CHT = MO - (EE + PB)$ e os nutrientes digestíveis totais (NDT), segundo as equações do NRC (2001): $NDT = \{0,98 \times (100 - [(FDN - NIDN) + PB + EE + MM])\} + \{PB \times \exp [-1,2 \times (NIDA/PB)]\} + \{0,75 \times [(NIDN - FDN) - LIG] \times [1 - (LIG/(NIDN - FDN)) 0,667]\} + DEE$, sendo $DEE = \%EE$, porém, quando a $\%EE < 1$, $DEE = 0$.

Também foram estimadas as frações dos carboidratos, sendo que: a fração C foi calculada pela fórmula descrita por Sniffen et al., (1992), $C = (100 \times FDN (\%MS) \times 0,01 \times LIG (\%FDN) \times 2,4/CHT (\%MS))$; a fração B2 foi obtida pela equação: $B2 = 100 \times ((FDN(\%MS) - PIDN(\%PB) \times 0,01 \times PB(\%MS)) - FDN(\%MS) \times 0,01 \times LIG(\%FDN) \times 2,4))/CHT(\%MS)$ e a fração A + B1 foi determinada pela diferença entre $100 - (C + B2)$.

A digestibilidade “in vitro” da MS (DIVMS) foi obtida segundo a metodologia descrita por Tilley; Terry, (1963), seguindo as modificações descritas por Holden, (1999), com uso do equipamento Daisy II (ANKOM technology).

Foram separadas amostras de aproximadamente 500 gramas, seladas e acomodadas em uma caixa de isopor com gelo seco, e enviadas ao laboratório da ESALQ, para a determinação dos ácidos orgânicos. As concentrações dos ácidos orgânicos foram determinadas utilizando um cromatógrafo a gás com detector de espectrometria de massa (GCMS QP 2010 Plus, Shimadzu, Kyoto, Japão), equipado com uma coluna capilar (Stabilwax, Restek, Bellefonte, PA, EUA, 60 m, 0,25 mm de diâmetro interno, 0,25 µm de polietileno cross-bond carbowax glycol). A concentração de ácido láctico também foi determinada pelo método colorimétrico proposto por Pryce (1969).

3.4 Análise Estatística

Os dados obtidos foram analisados com o auxílio do software R (R Core Team, 2023) verificando a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett.

O conjunto de dados foi analisados, pelo pacote EXPDES.pt (Pacote Experimental Designs (Portuguese) (Ferreira; Cavalcanti; Nogueira, 2014) do software R, de acordo com a seguinte modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + e_i$$

Onde: Y_{ijk} = variável dependente, μ = média geral, A_i = efeito do tratamento ($i = 1$ a 5), e e_i = erro. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e regressão, adotando-se nível de significância de 5%.

4. RESULTADOS

A adição do blend de óleos essenciais ocasionou mudanças nos padrões fermentativos e perdas nas silagens de milho ($p < 0,05$) (Tabela 2).

Os maiores valores de perdas decorrentes da produção de gases (PGAS) foi encontrado nas silagens com as maiores doses do blend de óleo essencial (800 mg kg^{-1} de MV), enquanto as menores foram constatadas nas silagens que receberam metade da dose máxima (400 mg kg^{-1} de MV). As perdas gasosas apresentaram comportamento quadrático ($p = 0,010$), em função das doses de óleos essenciais. De modo similar, as perdas pela geração de efluentes (PEFLU) também apresentou o mesmo comportamento ($p = 0,010$), com as maiores perdas ocorreram nas silagens com 800 mg kg^{-1} de MV e as menores nas silagens com 400 mg kg^{-1} de MV. Ressalta-se que, em comparação as silagens sem adição do óleo essencial, o tratamento com 400 mg kg^{-1} apresentou as menores perdas gasosas e por efluentes.

Tabela 2. Valores de perdas fermentativas em silagens com adição de óleos essenciais

Parâmetros	Doses de Blend de Óleos Essenciais (mg kg^{-1} de MV)					EPM ^y	p-valor	
	0	200	400	600	800		Linear	Quadrático
PGAS (%)	5,45	4,70	3,17	4,43	6,05	0,3186	0,687	0,010
PEFLU (%)	12,12	10,46	7,04	9,86	13,46	0,7085	0,687	0,010
RMS (%)	98,05	95,74	96,75	93,82	92,86	0,7085	-	-

RMV (%)	94,26	92,97	90,24	91,45	92,78	0,4973	-	-
---------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	---	---

Legenda: PGAS (%) – Percentual de perdas por gases na fermentação; PEFLU (%) – Percentual de perdas por efluentes na fermentação; RMS (%) – Recuperação de matéria seca; RMV (%) – Recuperação de matéria verde; EPM^v – Erro-padrão da média; (-) – Sem efeito significativo ($p>0,05$).

Especificamente, os valores mínimos foram registrados na dose de 400 mg kg⁻¹ de MV, com 3,17% para PGAS e 7,04% para PEFLU. Essa redução representa aproximadamente 42% em comparação ao tratamento controle (0 mg kg⁻¹), que exibiu 5,45% para PGAS e 12,12% para PEFLU. A partir da dose de 400 mg kg⁻¹, verificou-se um incremento progressivo nessas perdas, culminando em 6,05% para PGAS e 13,46% para PEFLU na dose de 800 mg kg⁻¹ (Figura 1A e 1B). A curva de regressão quadrática, ajustada aos dados, representada pela linha verde nos gráficos, ilustra claramente esse padrão, com pontos pretos indicando as médias dos silos experimentais.

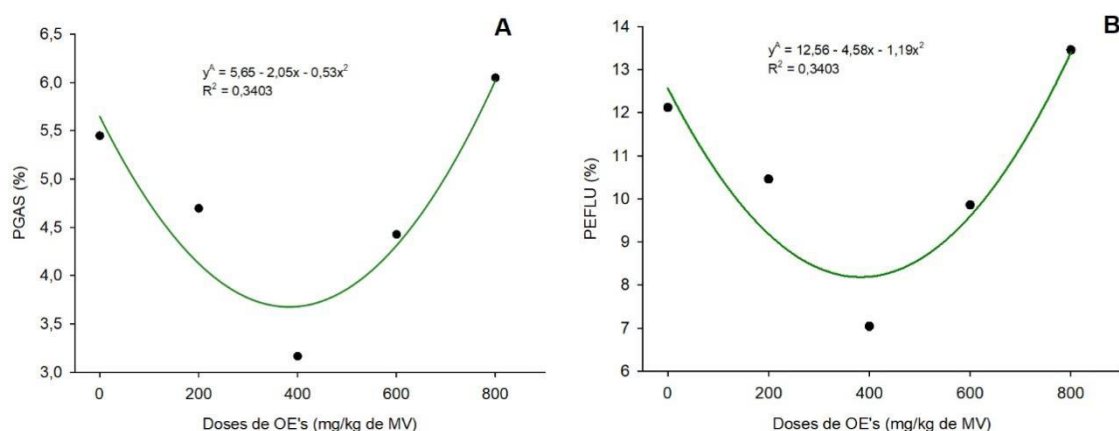


Figura 1: (A) Perdas por gases - PGAS e (B) perdas por efluentes - PEFLU de silagens de milho com diferentes doses de blend de óleos essenciais. Os pontos pretos representam as médias dos silos experimentais, e a linha verde representa a curva de regressão quadrática ajustada aos dados.

Apesar das menores perdas por gases e efluentes com a dose de 400mg de óleo essencial por kg de MV, os valores de recuperação de matéria seca (RMS) e

recuperação de matéria verde (RMV), não apresentaram diferenças significativas ($p>0,005$) em função da inclusão das doses do blend de óleos essenciais. Os valores médios para RMS variaram de 92,86% a 98,05%, enquanto RMV oscilaram entre 90,24% e 94,26%, com erro-padrão da média (EPM) de 0,7085 e 0,4973 respectivamente. Além das perdas físicas (gases e líquidos) pode ocorrer perdas fermentativas (bioquímicas), que alteram diretamente a proporção de recuperação do material ensilado.

A Tabela 3 detalha a composição bromatológica das silagens de milho tratadas com as doses do blend de óleos essenciais.

Tabela 3. Composição bromatológica de silagem de milho com adição de óleos essenciais

Parâmetros	Doses de Blend de Óleos Essenciais (mg kg ⁻¹ de MV)					EPM ^y	p-valor	
	0	200	400	600	800		Linear	Quadrático
MS (%)	32,03	32,28	32,43	30,41	30,13	0,2335	<0,001	<0,001
MM (% MS)	5,03	4,29	4,05	4,59	4,71	0,0750	0,5324	<0,001
FDN (% MS)	57,24	55,79	56,47	59,86	58,24	0,4982	-	-
FDA (% MS)	44,13	44,34	43,23	45,01	46,12	0,8852	-	-
HCEL (% MS)	13,11	11,45	13,24	14,85	12,12	1,0480	-	-
LIG (% MS)	2,72	1,93	2,32	2,47	2,72	0,1411	-	-
CEL (% MS)	41,41	42,41	42,29	42,54	43,40	0,9276	-	-
EE (% MS)	2,65	2,75	3,07	3,64	3,73	0,1155	<0,001	<0,001
PB (% MS)	8,72	8,17	7,49	7,63	7,08	0,1537	<0,001	<0,001
Ntotal (% MS)	1,39	1,31	1,20	1,22	1,13	0,0246	<0,001	<0,001
NDT (%)	79,29	79,28	79,33	79,25	79,20	0,0425	-	-
CHT (% MS)	83,61	84,79	85,38	84,15	84,48	0,1868	0,4148	0,0470
DIVMS (%)	81,56	80,42	81,07	80,36	79,59	0,4057	-	-
CNF (%MS)	13,39	9,67	11,56	11,84	13,26	0,7071	-	-
B2 (%)	43,85	46,12	43,44	48,02	44,99	0,8710	-	-
A+B1 (%)	26,36	29,00	28,91	24,28	26,24	0,5871	0,2390	0,2450

Legenda: MS = matéria seca; MM = matéria mineral; FDN = fibra em detergente neutro; FDA = fibra em detergente ácido; HCEL = hemicelulose; LIG = lignina; CEL = celulose; EE = extrato etéreo; PB = proteína bruta; Ntotal = nitrogênio total; NDT = nutrientes digestíveis totais; CHT = carboidratos totais; DIVMS = digestibilidade in vitro da matéria seca; CNF = carboidratos não fibrosos; B2 = carboidratos de degradação intermediária; A+B1 = carboidratos de rápida degradação ruminal.; EPM^y – Erro-padrão em detergente neutro; (-) – Sem efeito significativo (p>0,05).

Os teores de matéria seca (MS) se ajustaram tanto ao comportamento quadrático como linear, em ambos como valor de p<0,001. A adição do blend de óleos essenciais até 400 mg kg⁻¹ de MV promoveram um leve incremento na MS. Nas doses maiores (600 e 800 mg kg⁻¹ de MV) os teores de MS foram reduzidos (Figura 2A).

Os teores da matéria mineral (MM) exibiram resposta quadrática (p<0,001), com valores mínimos na dose de 400 mg kg⁻¹ de MV (4,05% de MM), refletindo uma maior conservação da fração orgânica nas silagens com essa concentração, uma vez que a matéria orgânica (MO) é resultado da diferença entre o todo e a MM (100 - MM), resultando em valores aproximados de 95,95% para MO (Figura 2B). O EPM para MM foi de 0,0750, indicando baixa variabilidade.

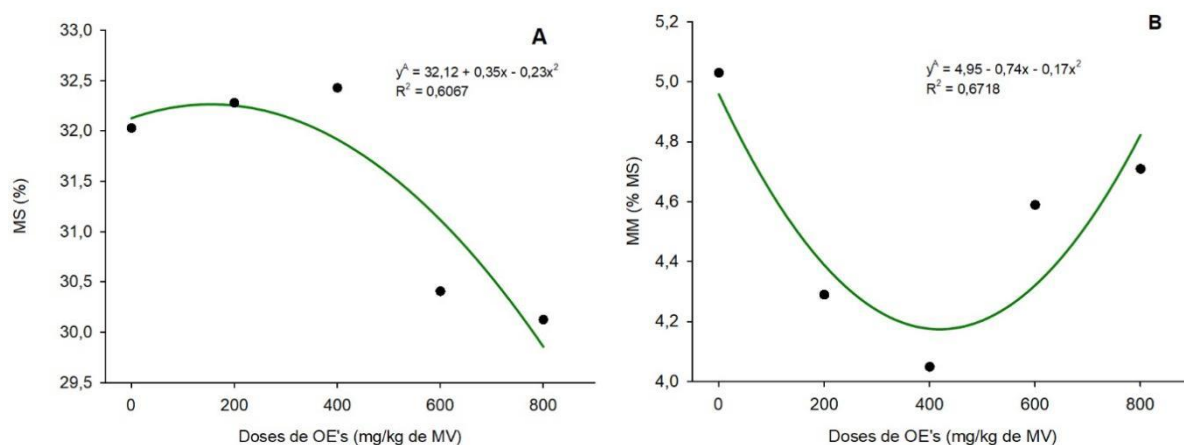


Figura 2. (A) Teores de Matéria seca - MS e **(B)** matéria orgânica - MO de silagens de milho com diferentes doses de blend de óleos essenciais. Os pontos pretos distribuídos no gráfico representam as médias dos silos experimentais, e a linha verde representa a curva de regressão quadrática ajustada aos dados.

Os teores de extrato etéreo (EE) aumentaram de forma quadrática (p<0,001), de 2,65% no controle para 3,73% (Figura 3A). Inversamente, a proteína bruta (PB) e o nitrogênio total (Ntotal) que apresentaram mesmo comportamento quadrático

($p < 0,001$), mas, com fator negativo (redução dos valores), com PB caindo de 8,72% para 7,08% e Ntotal de 1,39% para 1,13% (Figuras 3B e 3C, respectivamente).

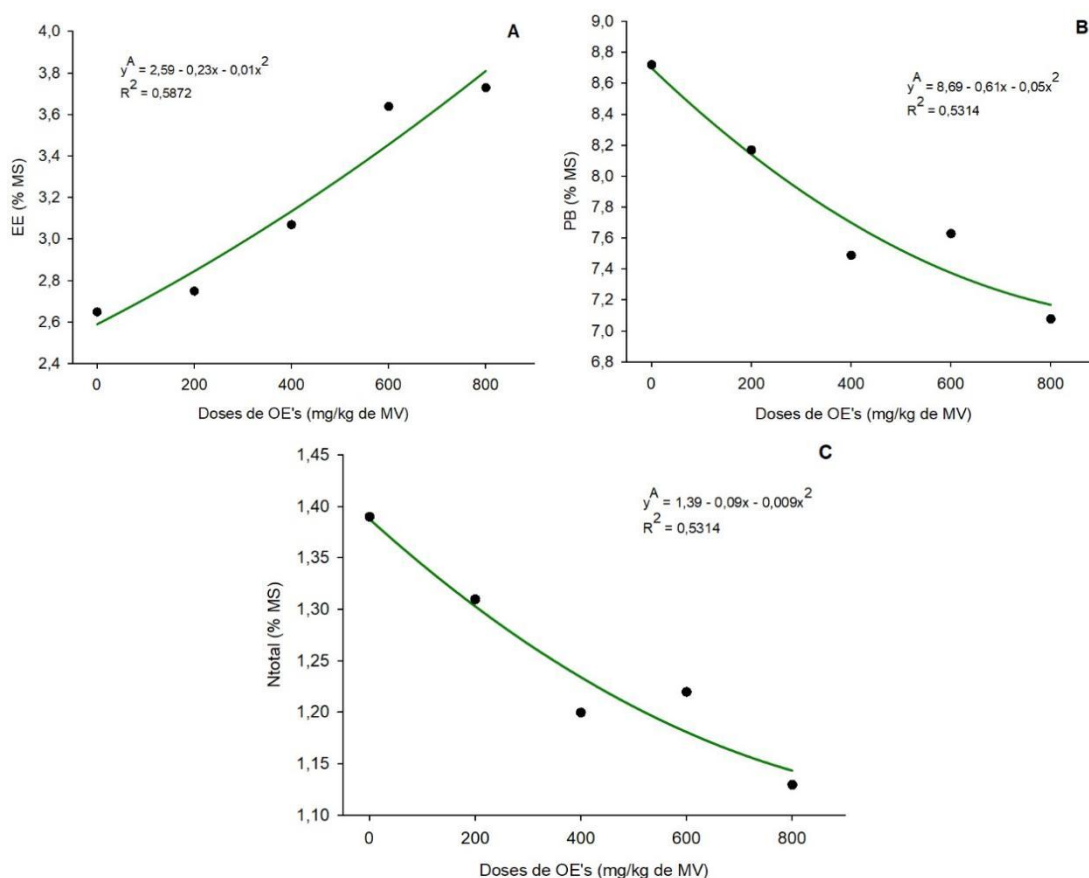


Figura 3. (A) Extrato etéreo – EE, **(B)** proteína bruta – PB e **(C)** nitrogênio total – Ntotal de silagens de milho com diferentes doses de blend de óleos essenciais. Os pontos pretos distribuídos no gráfico representam as médias dos silos experimentais, e a linha verde representa a curva de regressão quadrática ajustada aos dados.

Parâmetros fibrosos, como fibra em detergente neutro (FDN, variando de 55,79% a 59,86%), fibra em detergente ácido (FDA, 43,23% a 46,12%), hemicelulose (HCEL, 11,45% a 14,85%), lignina (LIG, 1,93% a 2,72%) e celulose (CEL, 41,41% a 43,40%), não apresentaram alterações significativas ($p > 0,05$), com EPM variando de 0,4982 a 1,0480. Similarmente, os nutrientes digestíveis totais (NDT, ~79%) e a digestibilidade in vitro da matéria seca (DIVMS, ~80%) não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$), indicando que o aditivo não afeta negativamente a fração fibrosa ou a disponibilidade nutricional. Outros parâmetros, como nitrogênio insolúvel

em detergente neutro (NIDN), proteína insolúvel em detergente neutro (PIDN), nitrogênio insolúvel em detergente ácido (NIDA) e proteína insolúvel em detergente ácido (PIDA), também não tiveram seus valores significativamente alterados.

Os carboidratos totais (CHT) exibiram efeito quadrático ($p=0,047$), com as maiores concentrações nas silagens tratadas com 400 mg de óleo essencial por kg de MV, representando um acréscimo de 1,77% em relação ao controle (85,38 vs 83,61%). Doses superiores resultaram em reduções nos teores de CHT (Figura 4A).

A inclusão de doses crescentes do blend de óleos essenciais não promoveu alterações significativas nos teores de carboidratos não fibrosos (CNF), que variaram de 9,67% a 13,39% da matéria seca, com erro padrão da média de 0,7071 e ausência de efeitos linear ou quadrático ($p>0,05$), conforme apresentado na Tabela 3. Da mesma forma, a fração de carboidratos de rápida degradação ruminal (A+B1), composta principalmente por carboidratos solúveis de rápida fermentação, oscilou entre 24,28% e 29,00% da matéria seca.

A fração de carboidratos de degradação intermediária (B2), representada majoritariamente por hemicelulose e parte da celulose potencialmente solúvel, apresentou valores médios entre 43,44% e 48,02% da matéria seca, com erro-padrão da média de 0,8710 e sem respostas significativas linear ou quadrática ($p>0,05$). Esses resultados indicam que, apesar do efeito quadrático observado nos carboidratos totais (CHT), as frações de carboidratos, com maior potencial de resposta animal, permaneceram inalteradas, independente das doses testadas.

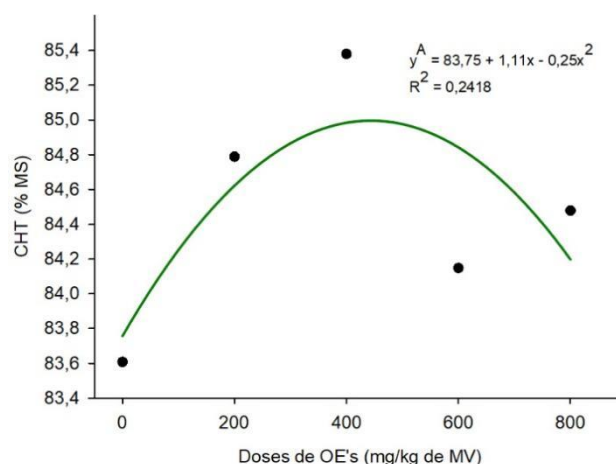


Figura 4. Carboidratos totais – CHT de silagens de milho com diferentes doses de blend de óleos essenciais. Os pontos pretos representam as médias dos silos experimentais, e a linha verde representa a curva de regressão quadrática ajustada aos dados.

A estabilidade aeróbia foi avaliada pelo monitoramento da temperatura interna dos silos e da diferença de temperatura (DF = temperatura do silo - temperatura ambiente) ao longo de 177 horas de exposição ao ar (Figura 5).

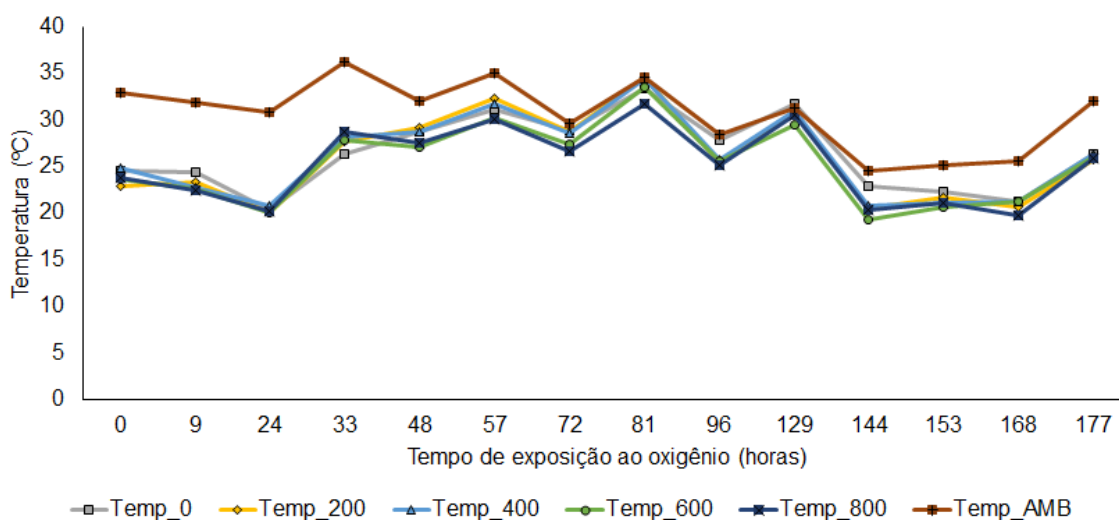


Figura 5. Registro das temperaturas médias dos silos experimentais com adição de blend de óleos essenciais e da temperatura ambiente para cada horário monitorado.

O perfil térmico seguiu padrão trifásico consistente: fase inicial de resfriamento (0-24 h, temperaturas ~20-21°C), fase de aquecimento intenso (24-81 h, picos entre 81-96 h) e fase final de resfriamento progressivo (após 129 h, estabilizando ~26°C). Os picos térmicos variaram: 34,58°C a 200 mg kg⁻¹, 34,38°C a 400 mg kg⁻¹, 33,42°C no controle e mínimo de 31,78°C a 800 mg kg⁻¹.

A análise de DF revelou padrões distintos (Figura 6): apenas o controle exibiu DF positivo (+0,4°C às 129 h). Todos os tratamentos com blend mantiveram DF negativos, com 200 mg kg⁻¹ mais próximo do equilíbrio (-0,02°C às 81 h) e 800 mg kg⁻¹ apresentando os valores mais negativos (-2,82°C às 81 h), sugerindo maior estabilidade térmica com a dose mais elevada.

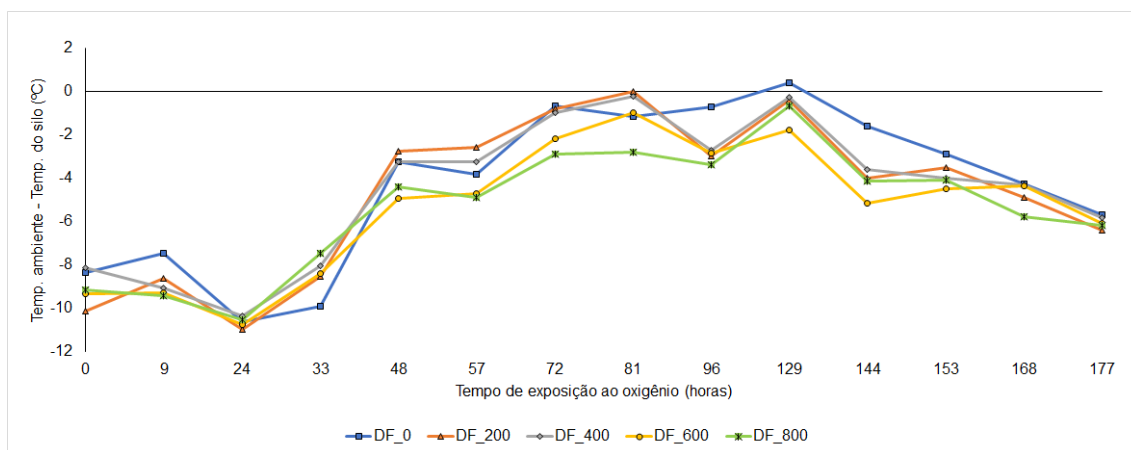


Figura 6. Diferença de temperaturas (silagem e ambiente) em silagens de milho, com diferentes doses de *blend* de óleos essenciais, exposta ao oxigênio.

O pH aumentou significativamente ($p < 0,001$) em todos os tratamentos ao longo do tempo (Figura 7). Na abertura (0 h), a silagem sem óleos essenciais apresentou pH médio de 3,05, inferior as médias das silagens com óleos essenciais (3,11 a 3,13). Após 57 h, o tratamento controle e o de 200 mg kg⁻¹ elevaram-se aceleradamente (4,03 e 4,14), enquanto 600 e 800 mg kg⁻¹ atenuaram (3,90 e 3,89). Aos 105 h, o controle atingiu 5,49, contrastando com 4,69 a 600 mg kg⁻¹. Aos 177 h, todos foram alcalinos ($> 7,0$), com controle em 8,53 e 600 mg kg⁻¹ em 7,89.

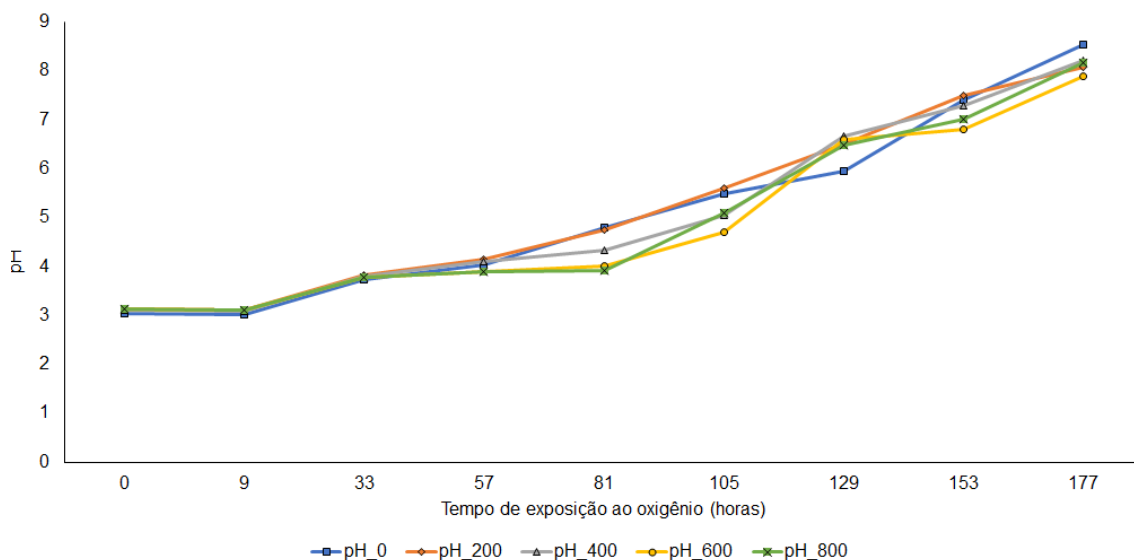


Figura 7. Registro das medidas de pH dos silos experimentais com adição de blend de óleos essenciais para cada horário monitorado.

A Tabela 4 resume os parâmetros fermentativos. Embora se tenha observado aumento numérico nos teores de ácido láctico com a aplicação das doses (máximo 6,86% a 200 mg kg⁻¹), não houve diferença estatística significativa entre os tratamentos ($p > 0,05$). Para os demais compostos, verificaram-se diferenças significativas entre as doses para os teores de etanol (máximo de 0,23 mg kg⁻¹ na dose próxima a 600 mg kg⁻¹, Figura 8B) e acetato de etila (máximo na dose de 600 mg kg⁻¹, Figura 9A). O ácido propiônico reduziu significativamente com o aumento das doses, com menor valor observado na dose de 400 mg kg⁻¹ (Figura 9B). Não houve efeito significativo das doses sobre os teores de acetona, metanol, ácido acético e ácido butírico ($p > 0,05$).

Tabela 4. Parâmetros fermentativos de silagem de milho com adição de níveis de óleos essenciais

Parâmetros	Doses de Blend de Óleos Essenciais (mg kg ⁻¹ de MS)					EPM ^y	<i>p</i> -valor	
	0	200	400	600	800		Linear	Quadrático
Ác. Láctico (% MS)	4,59	6,86	4,71	6,34	4,61	0,3063	0,8368	0,2712
Acetona (mg kg ⁻¹ de MS)	32,31	29,57	24,51	30,73	10,68	2,9874	-	-
Acet. Etila (mg kg ⁻¹ de MS)	67,18	87,56	125,01	135,24	97,16	8,3991	0,0673	0,0101
Metanol (mg kg ⁻¹ de MS)	288,52	342,73	262,86	343,11	261,42	1,52212	-	-
Iso Prop. (mg kg ⁻¹ de MS)	89,03	52,13	62,21	120,75	16,46	1,25587	-	-
Etanol (mg kg ⁻¹ de MS)	0,11	0,16	0,2	0,23	0,16	0,0136	0,0453	0,0027
Acet. Propila (mg kg ⁻¹ de MS)	8,13	7,05	5,53	6,14	3,63	0,8662	-	-
Butanol (mg kg ⁻¹ de MS)	25,13	13,19	13,49	17,54	20,15	2,5042	-	-
Propanol (mg kg ⁻¹ de MS)	373,61	248,73	85,48	288,88	110,69	38,4806	-	-

Lac. Etila (mg kg ⁻¹ de MS)	147,23	207,95	256,26	277,81	185,15	17,3364	-	-
Ác. Acético (% MS)	0,66	0,70	0,58	0,66	0,53	0,0228	-	-
Ác. Propionico (mg kg ⁻¹ de MS)	1342,26	613,33	296,92	313,56	331,96	112,501 4	<0,001	<0,001
Butanediol (mg kg ⁻¹ de MS)	195,04	223,74	192,68	287,36	220,78	14,5202	-	-
Iso Butirico (mg kg ⁻¹ de MS)	91,23	109,52	67,05	50,32	76,63	15,6582	-	-
Propanoediol (mg kg ⁻¹ de MS)	770,22	540,4	579,69	570,04	551,88	77,0995	-	-
Ác. Butirico (% MS)	0,51	0,15	0,2	0,22	0,37	0,0655	-	-
Ác. Iso Valérico (mg kg ⁻¹ de MS)	66,43	27,74	36,66	40,68	63,23	8,7475	-	-
Ác. Valérico (mg kg ⁻¹ de MS)	117,21	55,95	73,89	112,65	174,96	20,7957	-	-

Legenda: Ác. Láctico = ácido láctico; Acetona = acetona; Acet. Etila = acetato de etila; Metanol = metanol; Iso Prop. = isopropanol; Etanol = etanol; Acet. Propila = acetato de propila; Butanol = butanol; Propanol = 1-propanol; Lac. Etila = lactato de etila; Ác. Acético = ácido acético; Ác. Propiônico = ácido propiônico; Butanediol = 2,3-butanodiol; Iso Butírico = ácido isobutírico; Propanodiol = 1,2-propanodiol; Ác. Butírico = ácido butírico; Ác. Isovalérico = ácido isovalérico; Ác. Valérico = ácido valérico; MS = matéria seca; EPM^y – Erro-padrão da média; (-) – Sem efeito significativo (p>0,05).

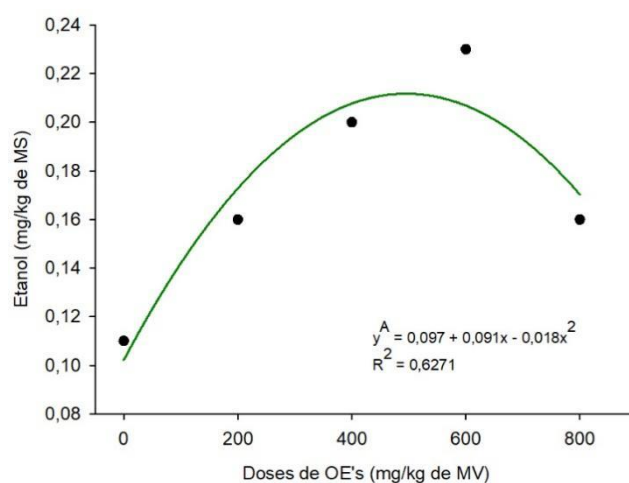


Figura 8. Teores de etanol em silagens de milho com diferentes doses de blend de óleos essenciais. Os pontos pretos representam as médias dos silos

experimentais, e a linha verde representa a curva de regressão quadrática ajustada aos dados.

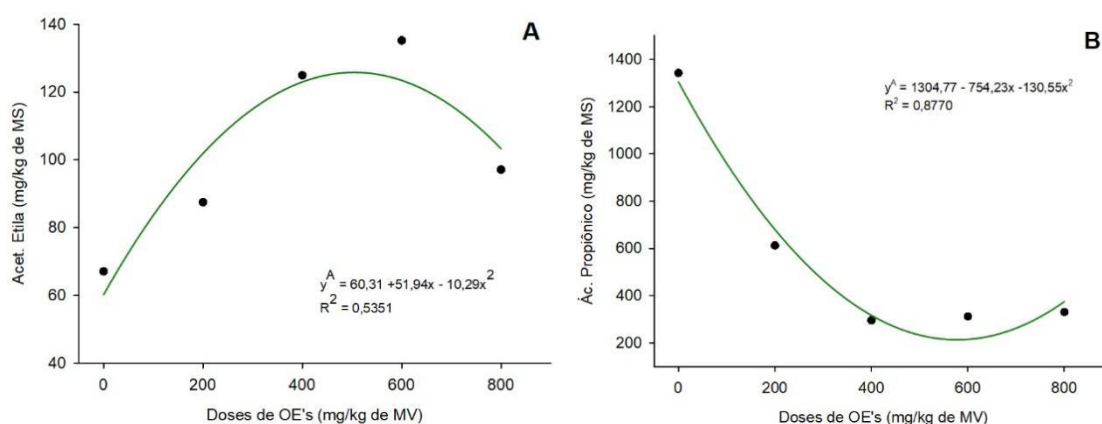


Figura 9. (A) Teores de acetato de etila e **(B)** ácido propiônico em silagens de milho com diferentes doses de blend de óleos essenciais. Os pontos pretos representam as médias dos silos experimentais, e a linha verde representa a curva de regressão quadrática ajustada aos dados.

A adição do blend de óleos essenciais aumentou a produção de etanol até a dose de 600 mg kg⁻¹, com redução na dose máxima estudada (800 mg kg⁻¹). Similarmente, as concentrações de acetato de etila atingiram níveis máximo na dose de 600 mg kg⁻¹.

A maior mudança, nos produtos da fermentação, foi observada nas silagens com adição do blend de óleos essenciais, que ocasionou redução drástica na produção de ácido propiônico, com menores concentrações nas silagens com 400 mg de óleos essenciais por kg de MV (296,92 mg kg⁻¹ de MS). Em comparação as silagens sem óleos essenciais, a redução observada foi de 1.045,34 mg de ácido propiônico por kg de MS.

5. DISCUSSÃO

A adição de um blend de óleos essenciais composto por carvacrol e cinamaldeído em silagens de milho revelou impactos multifacetados sobre os processos fermentativos, a composição nutricional, a estabilidade aeróbia e o perfil de ácidos orgânicos.

O comportamento quadrático observado nas perdas por gases (PGAS) e por efluentes (PEFLU), com valores mínimos na dose de 400 mg kg⁻¹ de matéria seca (MS), sugere uma inibição seletiva e dose-dependente de microrganismos indesejáveis durante a fase anaeróbia da fermentação. Essa redução de aproximadamente 42% em relação ao controle pode ser explicada pela ação antimicrobiana sinérgica do carvacrol e cinamaldeído, que atuam como disruptores de membranas celulares de leveduras, enterobactérias e bactérias heterofermentativas, reduzindo a produção de CO₂ e compostos voláteis.

Soycan-Önenç et al., (2015), em estudo com silagens de ervilha tratadas com óleos essenciais de orégano (rico em carvacrol) e canela (rico em cinamaldeído), reportaram reduções similares nas perdas por gases, atribuindo o efeito à inibição de vias glicolíticas em microrganismos aeróbios iniciais, o que preserva carboidratos solúveis e minimiza a formação de efluentes. Os autores enfatizam que o carvacrol, um monoterpreno fenólico, altera a permeabilidade da membrana plasmática, levando à perda de íons e ATP, enquanto o cinamaldeído, um aldeído fenilpropanoide, inibe enzimas como a ATPase, comprometendo o metabolismo energético.

Essa seletividade permite uma fermentação mais eficiente em doses moderadas, onde a atividade de bactérias ácido-láticas (BAL) homofermentativas é preservada, resultando em menor produção de gases e efluentes. Entretanto, em doses elevadas (800 mg kg⁻¹), o aumento nas perdas observadas neste estudo pode decorrer de uma inibição excessiva de bactérias ácido-láticas (BAL) homofermentativas, essenciais para a acidificação rápida e eficiente da silagem.

Kung et al., (2008), ao avaliar um blend similar em silagens de milho, observaram que doses acima de 80 mg kg⁻¹ de MN não melhoraram a fermentação e, em alguns casos, comprometeram a estabilidade aeróbia, explicando que compostos essenciais em altas concentrações podem suprimir a atividade de *Lactobacillus* spp., permitindo a proliferação de bactérias não desejáveis que aumentam perdas por efluentes.

Além disso, Chaves et al., (2009) em sistemas de cultura contínua com dietas à base de cevada ou milho suplementadas com carvacrol e cinamaldeído, notaram reduções em perdas fermentativas atribuídas à modulação de vias microbianas, onde

doses moderadas inibem enterobactérias sem afetar BAL, alinhando-se aos nossos resultados em 400 mg kg⁻¹.

A ausência de efeitos significativos na recuperação de matéria seca (RMS) e matéria verde (RMV) contrasta com relatórios de Foskolos et al. (2016), em silagens de azevém tratadas com cinamaldeído e carvacrol, onde aumentos na RMS foram atribuídos à inibição de deaminação proteica por esses compostos, que bloqueiam aminotransferases bacterianas e preservam frações orgânicas.

A falta de resposta aqui pode resultar da microbiota epífita do milho, rica em enterobactérias resistentes, como sugerido por Chen et al., (2023) em revisão sobre óleos essenciais em silagens, onde a seletividade antimicrobiana varia com o substrato vegetal, influenciando a eficiência de recuperação. Além disso, pôr a cultura de milho apresentar excelentes atributos bioquímicos, o efeito do uso de aditivos pode ser minimizado. Adicionalmente, Shuo et al., (2024) em silagens de milho com óleo de *Neolamarckia cadamba* observaram melhorias na RMS por inibição de *Bacillales* e *Saccharomycetales*, grupos microbianos que degradam matéria seca; a divergência pode indicar que o blend carvacrol-cinamaldeído é mais efetivo contra fungos do que bactérias gram-positivas em contextos de milho.

No entanto, testes em escala comercial são necessários para validar essas respostas sob variações climáticas, como destacado por Susanto et al., (2023), em meta-análise, que atribuem variabilidades a interações dose-substrato.

Além disso, Hodjatpanah-montazeri et al., (2016) em silagens de milho com diversos óleos essenciais, incluindo canela e orégano, observaram reduções em perdas por gases em doses similares, reforçando o papel de fenólicos na inibição de vias heterofermentativas. Em revisão, Chen et al., (2023), destacam que óleos essenciais reduzem perdas em até 50% em silagens de gramíneas, alinhando-se aos nossos 42%, mas alertam para toxicidade em altas doses, corroborando o aumento em 800 mg kg⁻¹.

Di Pasqua et al., (2007) demonstraram que carvacrol e cinamaldeído alteram a composição de ácidos graxos na membrana de bactérias, aumentando saturação e reduzindo fluidez, o que inibe crescimento de heterofermentadores como *Leuconostoc* spp., responsáveis por perdas gasosas.

Oancea; Catalin; Cismileanu, (2022), avaliando a adição de cinamaldeído ou carvacrol na dinâmica de fermentação ruminal, observaram modulações em ácidos voláteis, sugerindo impactos semelhantes em silagem. Nhara; Baloyi, (2025) em revisão sobre ácidos orgânicos e óleos essenciais, notaram sinergias que reduzem perdas em 30-40%, alinhando-se aos nossos resultados. Esses estudos coletivamente suportam que o blend otimiza fermentação anaeróbia, mas doses elevadas invertem benefícios por inibição não seletiva.

A composição bromatológica das silagens foi significativamente alterada pelo blend, com efeitos quadráticos predominantes indicando doses ótimas para conservação nutricional. Esses padrões refletem a modulação da atividade enzimática microbiana e a incorporação de componentes lipofílicos dos óleos essenciais.

No presente estudo, a MS apresentou média de 31,45%, valor considerado dentro da faixa ideal para silagem de milho, conforme descrito por Kung et al., (2018). O efeito quadrático na MS e MM, com mínimos em MM nas doses intermediárias (200-400 mg kg⁻¹), sugere uma otimização inicial da conservação por inibição seletiva de degradação microbiana, implicando em maiores teores de MO nessas doses.

Li et al., (2022), em silagens de milho com óleo de orégano (carvacrol), reportaram incrementos similares na MS, atribuindo à inibição de amilases e proteases bacterianas que minimizam a hidrólise de carboidratos e proteínas, elevando a fração seca. Os autores propõem que o carvacrol forma complexos hidrofóbicos com enzimas extracelulares, reduzindo sua atividade catalítica. Em doses altas, a redução drástica observada pode decorrer de lise celular excessiva de microrganismos benéficos, liberando umidade intracelular, como descrito por Besharati, M. et al., (2021) em silagens de alfafa com óleo de menta, onde doses acima de 200 mg kg⁻¹ comprometeram a integridade estrutural por estresse oxidativo induzido.

Para MM e MO, os valores mínimos em MM nas doses intermediárias alinharam-se com Foskolos et al., (2016), que atribuíram a preservação orgânica à inibição de deaminases por cinamaldeído, prevenindo a perda de nitrogênio volátil e mantendo frações carbonadas. Divergentemente, Hodjatpanah-montazeri et al., (2016) observaram declínios lineares em MO com óleos de canela em silagens de milho, explicando por inibição excessiva de BAL, levando a fermentações incompletas;

a diferença pode ser devida à proporção carvacrol-cinamaldeído neste blend, que favorece sinergia em doses moderadas, como revisado por (Chen et al., 2023), destacando interações moleculares que estabilizam compostos orgânicos.

Amaral et al. (2025) em silagens TMR com blend cinamaldeído-carvacrol, reportaram aumentos em recuperação de MS em doses similares, atribuindo à redução de perdas por efluentes via inibição de clostrídios. Em revisão por meta-análise, Susanto et al., (2023) verificaram que OE aumentam MO de 2 a 5% em silagens de gramíneas, alinhando-se aos nossos ~95,5% em 400 mg kg⁻¹.

O aumento quadrático no EE e as reduções inversas na PB e Ntotal indicam uma realocação metabólica, com os óleos essenciais incorporando lipídios voláteis enquanto modulam a proteólise. Hodjatpanah-montazeri et al. (2016), relataram aumentos similares em EE com óleos de canela e orégano, atribuindo à afinidade lipofílica do cinamaldeído e carvacrol, que se integram à matriz etérea, estabilizando frações gordurosas contra oxidação. Os autores sugerem que esses compostos formam micelas protetoras, reduzindo a volatilização de lipídios durante a fermentação.

Inversamente, a redução na PB diverge de Susanto et al., (2023) em meta-análise, que observaram aumentos na PB com óleos essenciais, explicando pela inibição seletiva de proteases clostridiais, preservando aminoácidos; a diminuição aqui pode resultar de inibição de BAL proteolíticas benéficas em doses elevadas, como proposto por Nehme et al., (2021) em revisão sobre óleos em pecuária, onde carvacrol em excesso inibe síntese proteica microbiana.

Para Ntotal, a redução quadrática alinha-se com Foskolos et al., (2016), atribuída à inibição de deaminases e ureases por cinamaldeído, reduzindo amônia volátil; divergências com Amini Pour et al., (2017) em silagens de alfafa com tomilho podem decorrer de substratos proteicos diferentes. Ma et al., (2024) reportaram reduções em N ruminal com blend similar, sugerindo efeitos em silagem semelhantes. Nhara; Baloyi, (2025) destacaram sinergias com ácidos orgânicos, reduzindo N-NH₃. Esses achados indicam que o blend favorece lipídios sobre proteínas, potencialmente beneficiando energia, mas requer equilíbrio para evitar perdas proteicas.

A estabilidade dos parâmetros fibrosos (FDN, FDA, HCEL, LIG, CEL) e NDT sugere que o blend não compromete a integridade fibrosa, alinhando-se com o

reportado por Del Valle et al., (2023) , em silagens de sorgo com óleo de capim-limão, onde a ausência de efeitos foi atribuída à seletividade antimicrobiana. Os autores explicam que compostos essenciais priorizam inibição de gram-negativos, preservando degradação fibrosa.

Li et al., (2022) observaram melhorias em degradabilidade de fibras com OE de orégano em silagem de milho, atribuindo à modulação de celulolíticos. Em revisão, Chen et al., (2023) notaram que OE não alteram fibras em 80% dos estudos, corroborando nossos achados. Wilson et al., (2020) em bovinos de corte com OE e silagem de milho reportaram estabilidade em FDN, sugerindo neutralidade nutricional.

A DIVMS inalterada contrasta com Yan et al., (2025) em alfafa com óleo de canela, que melhorou DIVMS por modulação de pH ruminal in vitro; a falta de efeito aqui pode ser por metodologias in vitro que não capturam interações microbianas complexas, como destacado por Chaves et al., (2012a) em silagens de cevada com OE.

Os resultados encontrados para CHT indicam preservação de substratos energéticos por inibição de vias heterofermentativas (via das pentoses-fosfato), reduzindo a descarboxilação e a consequente perda de CO₂, o que representou um acréscimo de 1,37% em relação ao controle. Chen et al., (2023) atribuem isso ao carvacrol, que atua seletivamente reduzindo o consumo de açúcares por leveduras e bactérias heterofermentativas, promovendo a via glicolítica (homolática) mais eficiente. Contudo, doses excessivas reduzem os CHT por uma inibição severa das bactérias ácido-láticas (BAL) totais, como observado por Turan; Önenç, (2018b) com óleo de cominho em alfafa, fenômeno explicado pelo estresse osmótico induzido que limita a síntese e disponibilidade de carboidratos. Nhara; Baloyi, (2025), em revisão, reforçaram que os óleos essenciais (OE) preservam os teores de carboidratos em silagens úmidas justamente por mitigarem essas perdas fermentativas secundárias.

A ausência de efeitos significativos ($p>0,05$) nas frações CNF, A+B1 e B2, em resposta à adição do blend de óleos essenciais indica que, apesar do efeito quadrático positivo, observado nos carboidratos totais (CHT), o aditivo não promoveu redistribuição detectável entre as frações de carboidratos de rápida solubilização/fermentação (CNF e suas frações A+B1 e B2). Esse resultado pode ser explicado pela ação antimicrobiana seletiva dos compostos fenólicos (carvacrol e

cinamaldeído), que inibem principalmente microrganismos heterofermentativos (*Leuconostoc* spp., *Weissella* spp.), enterobactérias e leveduras indesejáveis durante as fases iniciais da fermentação anaeróbia. Essa inibição preserva os carboidratos solúveis contra consumo excessivo e produção de gases/efluentes, mas sem alterar de forma marcante a atividade das bactérias ácido-láticas homofermentativas dominantes no milho (principalmente *Lactobacillus plantarum* e *L. buchneri* em menor proporção), que utilizam açúcares solúveis para produção de ácido lático.

Chen et al., (2023) revisaram que óleos essenciais ricos em fenóis geralmente preservam ou mantêm estáveis os carboidratos solúveis em silagens de gramíneas e milho, especialmente quando as doses não ultrapassam o limiar de toxicidade para BAL homofermentativas. A ausência de efeito significativo em CNF e A+B1 corrobora essa tendência e sugere que a faixa de doses testada (até 800 mg kg⁻¹) não atingiu o ponto em que ocorre inibição pronunciada das BAL que consomem açúcares solúveis.

Susanto et al., (2023), em meta-análise abrangente, observaram que aproximadamente 78% dos estudos com óleos essenciais em silagens não detectam alterações significativas na fração de carboidratos não fibrosos, particularmente em substratos ricos em amido como o milho, onde essa fração já é naturalmente elevada (geralmente >25–30%). O padrão de estabilidade aqui observado, alinha-se com essa conclusão geral e reforça que o blend atua mais efetivamente na proteção global dos carboidratos contra perdas oxidativas e heterofermentativas do que na modulação da proporção entre frações solúveis e intermediárias.

Foskolos et al., (2016) relataram estabilidade da fração solúvel em silagem de azevém tratada com cinamaldeído e carvacrol em doses moderadas, atribuindo o efeito à inibição seletiva da glicólise heterofermentativa sem interferência relevante na via homofermentativa. A similaridade com o presente estudo sugere que o milho, por apresentar maior proporção de amido (fração rapidamente solúvel), é ainda menos sensível a alterações nessas frações do que forragens de menor teor de grão.

A ausência de efeito significativo na fração B2 (principalmente hemicelulose e fração solúvel da celulose em tempo intermediário) é consistente com a estabilidade observada nos parâmetros fibrosos clássicos (FDN, FDA, HCEL, CEL, LIG_FDN), reforçando que o blend não comprometeu a integridade nem a hidrólise parcial das frações estruturais potencialmente fermentescíveis durante o processo de ensilagem.

Del Valle et al., (2023) avaliando óleo essencial de capim-limão em silagem de sorgo também não observaram alterações significativas na fração de carboidratos de degradação intermediária, atribuindo a neutralidade à baixa afinidade dos terpenos e fenóis pelas enzimas celulolíticas e hemicelulolíticas extracelulares, que são menos suscetíveis à inibição por compostos hidrofóbicos como carvacrol e cinamaldeído. Resultado análogo foi reportado por Li et al., (2022) em silagem de milho suplementada com óleo de orégano, onde a fração B2 permaneceu inalterada em doses até $\sim 600 \text{ mg kg}^{-1}$.

Chen et al., (2023) destacam, em revisão sistemática, que óleos essenciais fenólicos raramente modificam as frações fibrosas potencialmente solúveis (B2) em silagens de milho, devido ao alto grau de lignificação e à estrutura cristalina da celulose que protegem essas frações contra ação antimicrobiana direta. A estabilidade observada aqui reforça essa característica e indica que o blend não reduz o potencial energético de médio prazo proveniente da hemicelulose no rúmen.

O padrão trifásico de temperatura e o DF negativo em todos os tratamentos com blend demonstram maior estabilidade aeróbia, com doses elevadas minimizando picos térmicos e elevações de pH. Isso corrobora Amaral et al. (2025) em silagens TMR com cinamaldeído-carvacrol, que atribuíram a estabilidade à disruptura de membranas de leveduras e fungos por carvacrol, inibindo respiração aeróbia. Os autores detalham que o carvacrol aumenta a permeabilidade iônica, levando à depleção de ATP em *Saccharomyces* spp., enquanto cinamaldeído inibe ergosterol na parede fúngica, reduzindo proliferação durante exposição ao ar.

A dose de 800 mg kg^{-1} exibindo DF mais negativo sugere ação antifúngica dose-dependente, alinhando-se com Shuo et al., (2024), onde óleos essenciais inibiram *Saccharomycetales* e *Eurotiales* por mecanismos oxidativos, prevenindo aumento de temperatura e pH. Aniceto et al. (2024) em silagens de sorgo com OE reportaram estabilidade aeróbia estendida em 20-30 horas, atribuindo à inibição de fungos por terpenos. O controle com DF positivo reflete deterioração por proliferação de *Saccharomycetales* e *Eurotiales*, como em Turan; Önenç, (2018b), que atribuíram a instabilidade à ausência de inibidores, permitindo metabolismo aeróbio de ácidos orgânicos.

A atenuação do pH em doses intermediárias (600 mg kg^{-1}) sugere manutenção de ácidos orgânicos, alinhando-se com Soykan-Önenç et al., (2015) em silagens de ervilha com óleos de canela e orégano, explicada pela inibição de metabolismos alcalinizantes por fungos como *Aspergillus* spp. Divergências com Silva et al. (2024) em silagens de milho com óleo de laranja doce, que melhoraram estabilidade linearmente, podem decorrer da ausência de carvacrol, menos efetivo contra fungos, como destacado por Chen et al. (2023) em revisão, onde sinergias fenólicas como carvacrol-cinamaldeído prolongam estabilidade por até 131 horas.

Adicionalmente, Yan et al. (2025) reportaram que óleo de canela em alfafa atenuou elevações de pH por inibição de propionibactérias aeróbias, com resultados similares observados neste trabalho. Kung et al. (2008) observaram ausência de efeitos em estabilidade de milho, atribuindo a doses baixas; aqui, doses elevadas melhoram, sugerindo um limiar antimicrobiano.

Amaral et al. (2025) com OE em silagem de milho notaram estabilidade de 50-70 horas, alinhando-se aos nossos DF negativos. Hodjatpanah-montazeri et al., (2016) com OE em milho reportaram estabilidade de 2 semanas, reforçando potencial antifúngico. Del Valle et al. (2023) com OE de capim-limão em sorgo observaram reduções em perdas gasosas sem afetar estabilidade, divergindo por composição.

Em revisão, Chen et al. (2023) analisaram que OE aumentam estabilidade em 40-60%, alinhando-se aos nossos DF negativos. Nhara; Baloyi, (2025), destacaram sinergias com ácidos orgânicos para estabilidade. Esses estudos suportam que o blend melhora estabilidade por ação antifúngica seletiva, mas doses altas otimizam melhor. Di Pasqua et al. (2007) demonstraram que carvacrol altera ácidos graxos em membranas fúngicas, reduzindo respiração aeróbia.

Os aumentos quadráticos observados nos teores de etanol e acetato de etila ($p < 0,05$), com picos próximos à dose de 600 mg kg^{-1} , indicam uma modulação significativa do perfil fermentativo pelo blend. Embora o ácido láctico tenha apresentado seu maior valor nominal (6,86%) na dose de 200 mg kg^{-1} , este não apresentou efeito estatístico significativo ($p > 0,05$). Os valores encontrados neste trabalho estão compatíveis com os sugeridos por Kung et al. (2018), que recomenda níveis de 3-6% de MS. A literatura sugere que a seletividade antimicrobiana de óleos essenciais em doses moderadas (até 400 mg kg^{-1}) favorece a preservação da atividade de BAL

homofermentativas, resultando em menor produção de gases e efluentes por inibição de vias heterofermentativas e de leveduras.

A redução acentuada nos teores de ácido propiônico observada na dose de 400 mg kg⁻¹ diverge dos achados de Kung et al. (2008) e pode ser explicada pela inibição de bactérias do gênero *Propionibacterium* spp. Esses microrganismos são responsáveis pela conversão de lactato em propionato através da via de Wood-Werkman, e sua supressão pelo blend de óleos essenciais explicaria a menor concentração desse ácido. Paralelamente, Amaral et al. (2025b), ao avaliarem silagens TMR com um blend similar, reportaram incrementos na recuperação de matéria seca em doses próximas a 412 mg kg⁻¹, atribuindo o efeito à inibição de microrganismos heterofermentadores e clostrídios, o que se alinha aos pontos de máxima eficiência fermentativa observados neste estudo.

Outros ácidos inalterados contrastam com Soycan-Önenç et al., (2015), que reduziram acético por inibição de acetobactérias; ausência aqui por foco em vias lácticas, como em Hodjatpanah-montazeri et al. (2016, onde óleos priorizaram supressão heterofermentativa.

Yan et al. (2025) relataram reduções nos teores de ácido butírico com a adição de óleo essencial de canela, efeito atribuído à inibição de bactérias do gênero *Clostridium*; no presente estudo, a ausência de alterações nesse ácido pode estar relacionada à maior resistência da microbiota nativa. Chen et al. (2023) destacam que óleos essenciais modulam o perfil de ácidos orgânicos por meio da alteração na abundância de bactérias do gênero *Bacillus*, resultando na redução dos ácidos butírico e valérico.

Di Pasqua et al. (2007) atribuem a toxicidade do carvacrol e do cinamaldeído à desestabilização da membrana celular de patógenos, com redução de ácidos graxos insaturados, mecanismo que pode ser explorado em silagens para favorecer a preservação do ácido láctico. Em revisão recente, Nhara; Baloyi (2025) destacam sinergias entre óleos essenciais e ácidos orgânicos capazes de elevar os teores de ácido láctico em 20 a 30%, o que corrobora o aumento de 6,86% observado no presente estudo com a dose de 200 mg kg⁻¹.

6. CONCLUSÃO

A inclusão de um blend de carvacrol e cinamaldeído em silagens de milho modula favoravelmente o perfil fermentativo, a composição nutricional e a estabilidade aeróbia. Doses intermediárias, especificamente em torno de 400 mg kg⁻¹, representam o ponto de eficiência máxima, minimizando perdas gasosas e por efluentes, ao mesmo tempo que preservam substratos energéticos essenciais, como os carboidratos hidrossolúveis (CHT).

Embora o aditivo demonstre potencial como alternativa sustentável aos conservantes químicos - reduzindo impactos ambientais e inibindo microrganismos deterioradores - doses elevadas (acima de 600 mg kg⁻¹) podem ser contraproducentes, resultando em inibição microbiana excessiva e comprometimento da matéria seca e de ácidos orgânicos benéficos.

Portanto, conclui-se que o uso do blend na dose de 400 mg kg⁻¹ otimiza a conservação da forragem e melhora a estabilidade aeróbica. Pesquisas futuras são necessárias para validar estes efeitos no desempenho produtivo animal, na dinâmica da microbiota ruminal e na viabilidade econômica em escala de campo, considerando diferentes condições climáticas e estágios de maturação da cultura.

7. REFERÊNCIAS

ACHAR, Premila Narayana et al. Investigation of the Antifungal and Anti-Aflatoxigenic Potential of Plant-Based Essential Oils against *Aspergillus flavus* in Peanuts. **Journal of Fungi**, [s. l.], vol. 6, nº 4, p. 383, 2020.

AMARAL, Isabele Paola de Oliveira et al. Modulating Fermentation in Total Mixed Ration Silages Using Lasalocid Sodium and Essential Oils. **Fermentation**, [s. l.], vol. 11, nº 8, p. 468, 2025a.

AMARAL, Isabele Paola de Oliveira et al. The Fermentative and Nutritional Effects of Limonene and a Cinnamaldehyde–Carvacrol Blend on Total Mixed Ration Silages. **Fermentation** 2025, Vol. 11, Page 415, [s. l.], vol. 11, nº 7, p. 415, 2025b. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-5637/11/7/415/htm>. Acesso em: 2 set. 2025.

AMARAL, Isabele Paola de Oliveira et al. The Fermentative and Nutritional Effects of Limonene and a Cinnamaldehyde–Carvacrol Blend on Total Mixed Ration Silages. **Fermentation**, [s. l.], vol. 11, nº 7, p. 415, 2025c.

AMINI POUR, Hamed et al. Effect of Essential Plant Oil Used as an Additive to Alter Silage Fermentation in Ruminant by In Vitro. **Biosciences, Biotechnology Research Asia**, [s. l.], vol. 14, nº 1, p. 145–152, 2017.

ANICETO, Elon S. et al. Evaluation of Essential Oils and Their Blends on the Fermentative Profile, Microbial Count, and Aerobic Stability of Sorghum Silage. **Fermentation** **2024**, Vol. **10**, [s. l.], vol. 10, nº 7, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-5637/10/7/335>.

BACH, Alex et al. Modulation of milking performance, methane emissions, and rumen microbiome on dairy cows by dietary supplementation of a blend of essential oils. **animal**, [s. l.], vol. 17, nº 6, p. 100825, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731123001210>. Acesso em: 1 set. 2025.

BERNARDES, T. F.; DO RÊGO, A. C. Study on the practices of silage production and utilization on Brazilian dairy farms. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], vol. 97, nº 3, p. 1852–1861, 2014. Disponível em: <https://www.journalofdairyscience.org/action/showFullText?pii=S0022030213008795>. Acesso em: 25 nov. 2025.

BESHARATI, M. et al. Essential oil and apple pomace affect fermentation and aerobic stability of alfalfa silage. **South African Journal of Animal Science**, [s. l.], vol. 51, nº 3, p. 371–377, 2021. Disponível em: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0375-15892021000300010&lng=en&nrm=iso&tlng=en. Acesso em: 19 fev. 2026.

BORREANI, G. et al. Silage review: Factors affecting dry matter and quality losses in silages. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], vol. 101, nº 5, p. 3952–3979, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030218303205>. Acesso em: 9 jul. 2025.

BÜŞRA KONUK, Hatice; ERGÜDEN, Bengü. Antifungal activity of various essential oils against *Saccharomyces cerevisiae* depends on disruption of cell membrane integrity. **BIOCELL**, [s. l.], vol. 41, nº 1, p. 13–18, 2017.

CHAVES, A V et al. Effects of carvacrol and cinnamaldehyde on microbial fermentation when added to a barley- or corn-based diet in a continuous-culture system. **Canadian Journal of Animal Science**, [s. l.], vol. 89, nº 1, p. 97–104, 2009.

CHAVES, Alexandre V et al. Effects of cinnamon leaf, oregano and sweet orange essential oils on fermentation and aerobic stability of barley silage. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], vol. 92, nº 4, p. 906–915, 2012.

CHEN, Lijuan et al. The performance of plant essential oils against lactic acid bacteria and adverse microorganisms in silage production. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], vol. 14, 2023.

COSTA, Nídia Raquel et al. Yield and nutritive value of the silage of corn intercropped with tropical perennial grasses. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], vol. 52, nº 1, p. 63–73, 2017.

DE ANDRADE, Ronnie Coêlho et al. Impact of Monensin Sodium and Essential Limonene Oil on the Fermentation and Chemical Composition of Total Mixed Ration Silages with Moisture Variations. **Agriculture 2024, Vol. 14, Page 1319**, [s. l.], vol. 14, nº 8, p. 1319, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/14/8/1319/htm>. Acesso em: 2 set. 2025.

DEL VALLE, T. A. et al. Lemongrass essential oil reduces whole-plant sorghum silage gas losses and does not affect silage *in vitro* degradation. **The Journal of Agricultural Science**, [s. l.], vol. 161, nº 1, p. 6–12, 2023.

DI PASQUA, Rosangela et al. Membrane Toxicity of Antimicrobial Compounds from Essential Oils. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], vol. 55, nº 12, p. 4863–4870, 2007.

FERREIRA, Eric B.; CAVALCANTI, Pórtia P.; NOGUEIRA, Denismar A. ExpDes: An R Package for ANOVA and Experimental Designs. **Applied Mathematics**, [s. l.], vol. 05, nº 19, p. 2952–2958, 2014. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=ExpDes.pt>.

FOSKOLOS, A. et al. Effects of essential oil compounds addition on ryegrass silage protein degradation. **Canadian Journal of Animal Science**, [s. l.], vol. 96, nº 2, p. 100–103, 2016.

GUPTA, Akshi; JEYAKUMAR, Ebenezer; LAWRENCE, Rubina. Journey of limonene as an antimicrobial agent. **Journal of Pure and Applied Microbiology**, [s. l.], vol. 15, nº 3, p. 1094–1110, 2021. Disponível em: Acesso em: 1 set. 2025.

GUTIERREZ, Jorge et al. Efficacy of Plant Essential Oils against Foodborne Pathogens and Spoilage Bacteria Associated with Ready-to-Eat Vegetables: Antimicrobial and Sensory Screening. **Journal of Food Protection**, [s. l.], vol. 71, nº 9, p. 1846–1854, 2008.

GWIAZDOWSKA, Daniela et al. The Concentration-Dependent Effects of Essential Oils on the Growth of *Fusarium graminearum* and Mycotoxins Biosynthesis in Wheat and Maize Grain. **Applied Sciences**, [s. l.], vol. 12, nº 1, p. 473, 2022.

HODJATPANAH-MONTAZERI, Aliakbar et al. **Effect of Essential Oils of Various Plants as Microbial Modifier to Alter Corn Silage Fermentation and in vitro Methane Production**. [S. l.]: [s. d.], 2010. Disponível em: www.ijas.ir.

HODJATPANAH-MONTAZERI, Aliakbar et al. Effect of essential oils of various plants as microbial modifier to alter corn silage fermentation and in vitro methane production. **Iranian Journal of Applied Animal Science**, [s. l.], vol. 6, p. 269–276, 2016.

HOLDEN, L.A. Comparison of Methods of In Vitro Dry Matter Digestibility for Ten Feeds. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], vol. 82, nº 8, p. 1791–1794, 1999. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10480105/>.

IBGE. **PAM 2023: Safra bate recorde, mas valor da produção cai | Agência de Notícias**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/41296-pam-2023-safra-bate-recorde-mas-valor-da-producao-cai>. .

JOBIM, Clóves Cabreira et al. Avanços metodológicos na avaliação da qualidade da forragem conservada. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [s. l.], vol. 36, nº suppl, p. 101–119, 2007.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes, 1928.

KUNG, L. et al. A blend of essential plant oils used as an additive to alter silage fermentation or used as a feed additive for lactating dairy cows. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], vol. 91, nº 12, p. 4793–4800, 2008.

KUNG, L. et al. Added Ammonia or Microbial Inocula for Fermentation and Nitrogenous Compounds of Alfalfa Ensiled at Various Percents of Dry Matter. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], vol. 67, nº 2, p. 299–306, 1984. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030284813028>.

KUNG, Limin et al. Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], vol. 101, nº 5, p. 4020–4033, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030218303242>. Acesso em: 15 out. 2025.

LI, Xiongxiang et al. Effects of oregano essential oil, cobalt and synergistic of both of them on rumen degradation rate and fermentation characteristics for corn silage. **Italian Journal of Animal Science**, [s. l.], vol. 21, nº 1, p. 1476–1488, 2022.

MA, Zhiyuan et al. Effects of an essential oil blend rich in cinnamaldehyde and carvacrol on rumen biohydrogenation and fatty acid profile in the *longissimus lumborum* of growing lambs. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], vol. 104, nº 15, p. 9581–9591, 2024.

NEHME, Ralph et al. Essential Oils in Livestock: From Health to Food Quality. **Antioxidants**, [s. l.], vol. 10, nº 2, p. 330, 2021.

NHARA, Rumbidzai Blessing; BALOYI, Joseph Jimu. Complementary Effects of Essential Oils and Organic Acids on Rumen Physiology as Alternatives to Antibiotic Feed Additives. **Animals**, [s. l.], vol. 15, nº 19, p. 2910, 2025.

OANCEA, G. A.; CATALIN, D.; CISMILEANU, A. View of The Effects of Including Cinnamaldehyde or Carvacrol in Wethers' Diets on the Main Parameters of Rumen Metabolism. **Scientific Papers: Animal Science and Biotechnologies**, [s. l.], vol. 55, nº 1, p. 33–39, 2022. Disponível em:

https://www.spasb.ro/index.php/public_html/article/view/90/74. Acesso em: 19 fev. 2026.

PEQUENO, Diego N. L. et al. Forage Accumulation and Nutritive Value of Brachiariagrasses and Tifton 85 Bermudagrass as Affected by Harvest Frequency and Irrigation. **Agronomy Journal**, [s. l.], vol. 107, nº 5, p. 1741–1749, 2015.

PEREIRA, L. de M. **USO DE ÓLEOS ESSENCIAIS COMO ADITIVOS EM SILAGENS DE MILHO (*Zea mays*) E CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum officinarum*)**. 2018. - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

PRYCE, J. D. A modification of the Barker-Summerson method for the determination of lactic acid. **The Analyst**, [s. l.], vol. 94, nº 1125, p. 1151, 1969.

SCHMIDT, Patrick. **Perdas fermentativas na ensilagem, parâmetros digestivos e desempenho de bovinos de corte alimentados com rações contendo silagens de cana-de-açúcar**. 2006. 228 f. - Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, 2006.

SCHNEIDER, H.; SILVA, C.A. As características do clima de Dourados/MS e adjacências a partir da série histórica de 1980 a 2009. **Revista Geografares**, [s. l.], vol. 16, p. 01–21, 2014.

SHUO, Wu et al. Novel strategy to understand the aerobic deterioration of corn silage and the influence of *Neolamarckia cadamba* essential oil by multi-omics analysis. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], vol. 482, p. 148715, 2024.

SILVA, Ismael Nacarati da et al. Evaluation of sweet orange essential oil on fermentation and aerobic stability of corn silage. **Scientia Agricola**, [s. l.], vol. 81, 2024.

SILVA, D.J.; QUEIROZ, A.C. **Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos**. 3. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa (UFV), 2002.

SNIFFEN, C. J. et al. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability. **Journal of Animal Science**, [s. l.], vol. 70, nº 11, p. 3562–3577, 1992. Disponível em: <https://academic.oup.com/jas/article/70/11/3562/4705805>.

SOYCAN-ÖNENÇ, Sibel et al. The Effect of Oregano and Cinnamon Essential Oils on Fermentation Quality and Aerobic Stability of Field Pea Silages. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, [s. l.], vol. 28, nº 9, p. 1281–1287, 2015.

SUSANTO, Irwan et al. Evaluation of Essential Oils as Additives during Fermentation of Feed Products: A Meta-Analysis. **Fermentation**, [s. l.], vol. 9, nº 7, p. 583, 2023.

TILLEY, J. M. A.; TERRY, R. A. A TWO-STAGE TECHNIQUE FOR THE *IN VITRO* DIGESTION OF FORAGE CROPS. **Grass and Forage Science**, [s. l.], vol. 18, nº 2, p. 104–111, 1963. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2494.1963.tb00335.x>.

TURAN, Aslı; ÖNENÇ, Sibel Soycan. Effect of cumin essential oil usage on fermentation quality, aerobic stability and in vitro digestibility of alfalfa silage. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, [s. l.], vol. 31, nº 8, p. 1252–1258, 2018.

VAN SOEST, P.J.; ROBERTSON, J.B.; LEWIS, B.A. Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], vol. 74, nº 10, p. 3583–3597, 1991. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1660498/>.

WILKINSON, J. M.; DAVIES, D. R. The aerobic stability of silage: Key findings and recent developments. **Grass and Forage Science**, [s. l.], vol. 68, nº 1, p. 1–19, 2013. Disponível em: [/doi/pdf/10.1111/j.1365-2494.2012.00891.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2012.00891.x). Acesso em: 14 nov. 2025.

WILSON, Hannah C. et al. Impact of Essential Oils Blend on Beef Cattle Performance and Carcass Characteristics in Diets with Increasing Corn Silage Inclusions. **Nebraska Beef Cattle Reports**, [s. l.], p. 71–74, 2020. Disponível em: <https://digitalcommons.unl.edu/animalscinbcr/1076>. Acesso em: 19 fev. 2026.

YAN, Xingquan et al. High-moisture alfalfa silage fermentation: a comparative study on the impact of additives including formic acid, *Lactobacillus plantarum*, cinnamon essential oil, and wood vinegar. **Microbiology Spectrum**, [s. l.], vol. 13, nº 9, 2025.

ZHANG, Yunbin et al. Antibacterial activity and mechanism of cinnamon essential oil against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. **Food Control**, [s. l.], vol. 59, p. 282–289, 2016.

CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação avança o conhecimento em conservação de forragens tropicais, comprovando os benefícios de um blend de óleos essenciais (carvacrol e cinamaldeído) como aditivo natural em silagens de milho. Diferente de aditivos químicos convencionais, promove sustentabilidade agropecuária, reduzindo perdas fermentativas em até 42% e otimizando nutrientes em doses de 200-400 mg kg⁻¹, com ganhos em retenção de carboidratos e estabilidade aeróbia. Preenche lacunas na literatura sobre fitogênicos em climas tropicais, oferecendo soluções práticas para produtores e impulsionando autonomia forrageira em regiões como Mato Grosso do Sul, alinhando-se a demandas globais por pecuária ecológica e eficiente.

Apesar dos resultados robustos, limitações incluem o uso de silos laboratoriais, que não capturam dinâmicas comerciais em escala, e o foco em análises químico-físicas, deixando espaço para integrações biológicas e econômicas.

Para continuidade, sugere-se ensaios em campo com silos maiores, testando o blend em híbridos variados de milho, sorgo ou gramíneas perenes; análises microbiológicas via sequenciamento de DNA e detecção de micotoxinas; avaliações zootécnicas em ruminantes (ingestão, digestibilidade e desempenho); e estudos econômicos comparativos para subsidiar adoção tecnológica, fortalecendo uma pecuária resiliente e sustentável no Brasil.