

Alternativas nutricionales para mitigar la emisión de metano entérico en rumiantes: mecanismos antimethanogénicos y perspectivas sostenibles

Nutritional alternatives to mitigate enteric methane emissions in ruminants: antimethanogenic mechanisms and sustainable perspectives

Alternativas nutricionais para mitigar a emissão de metano entérico em ruminantes: mecanismos antimetanogênicos e perspectivas sustentáveis

Alcívar Chica Tommy Ray¹
Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López
tommy.alcivar@espam.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0004-7901-1200>



Rincón Acosta Fernando Javier²
Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López
fjrincon@espam.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-5670-1488>



 DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v7/n1/1497>

Como citar:

Álcivar-Chica, T. R. Rincón-Acosta, F. J. (2026). Alternativas nutricionales para mitigar la emisión de metano entérico en rumiantes: mecanismos antimethanogénicos y perspectivas sostenibles. *Código Científico Revista de Investigación*, 7(1), 1102-1122.

Recibido: 03/05/2026

Aceptado: 01/06/2026

Publicado: 30/06/2026

Resumen

La emisión de metano entérico en rumiantes representa una de las principales fuentes de gases de efecto invernadero asociadas a la producción pecuaria, generando impactos ambientales y pérdidas energéticas que afectan la sostenibilidad de los sistemas productivos. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo analizar críticamente las principales alternativas nutricionales utilizadas para mitigar la emisión de metano entérico en rumiantes, enfatizando sus mecanismos antimethanogénicos, efectos sobre la fermentación ruminal y repercusiones productivas. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo con integración cuantitativa de carácter descriptivo-explicativo, mediante un diseño no experimental de tipo documental y revisión sistemática crítica. Se emplearon los métodos analítico-sintético y deductivo para interpretar y relacionar la información científica recopilada. La técnica de investigación utilizada fue la revisión bibliográfica sistemática de literatura científica indexada en bases de datos internacionales como Scopus, Web of Science, ScienceDirect y PubMed. Como instrumento de recolección de datos se utilizó una matriz bibliográfica de análisis documental, considerando información proveniente de artículos científicos incluidos en la bibliografía general. Los resultados evidenciaron que *Asparagopsis taxiformis* y el 3-nitrooxipropanol presentaron la mayor eficacia antimethanogénica, mientras que taninos, aceites esenciales y lípidos mostraron efectos moduladores variables sobre la microbiota ruminal y el metabolismo del hidrógeno. Además, se identificó que la eficacia de dichas estrategias depende de factores asociados a composición dietética, adaptación microbiana, duración de suplementación y condiciones fisiológicas del animal. Se concluye que la mitigación efectiva del metano entérico requiere estrategias integradas orientadas hacia nutrición de precisión, modulación microbiológica y sostenibilidad metabólica en sistemas pecuarios modernos.

Palabras clave: metano entérico, rumiantes, estrategias nutricionales, microbioma ruminal, mitigación antimethanogénica.

Abstract

Enteric methane emissions from ruminants represent one of the major sources of greenhouse gases associated with livestock production, generating environmental impacts and energy losses that compromise the sustainability of productive systems. In this context, the objective of the present study was to critically analyze the main nutritional alternatives used to mitigate enteric methane emissions in ruminants, emphasizing their antimethanogenic mechanisms, effects on ruminal fermentation, and productive implications. The research was conducted under a qualitative approach with quantitative integration of a descriptive-explanatory nature, using a non-experimental documentary design and a critical systematic review. Analytical-synthetic and deductive methods were employed to interpret and relate the scientific information collected. The research technique used was the systematic bibliographic review of scientific literature indexed in international databases such as Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and PubMed. A bibliographic matrix for documentary analysis was used as a data collection instrument, considering information obtained from scientific articles included in the general bibliography. The results showed that *Asparagopsis taxiformis* and 3-nitrooxypropanol exhibited the highest antimethanogenic efficacy, whereas tannins, essential oils, and lipids demonstrated variable modulatory effects on ruminal microbiota and hydrogen metabolism. In addition, the effectiveness of these strategies was influenced by dietary composition, microbial adaptation, supplementation period, and animal physiological

conditions. It is concluded that effective mitigation of enteric methane requires integrated strategies focused on precision nutrition, microbial modulation, and metabolic sustainability in modern livestock systems.

Keywords: enteric methane, ruminants, nutritional strategies, ruminal microbiome, antimethanogenic mitigation.

Resumo

A emissão de metano entérico em ruminantes representa uma das principais fontes de gases de efeito estufa associadas à produção pecuária, gerando impactos ambientais e perdas energéticas que comprometem a sustentabilidade dos sistemas produtivos. Nesse contexto, o objetivo da presente pesquisa foi analisar criticamente as principais alternativas nutricionais utilizadas para mitigar a emissão de metano entérico em ruminantes, enfatizando seus mecanismos antimetanogênicos, efeitos sobre a fermentação ruminal e repercussões produtivas. A pesquisa foi desenvolvida sob uma abordagem qualitativa com integração quantitativa de caráter descritivo-explicativo, mediante um delineamento não experimental de tipo documental e revisão sistemática crítica. Foram utilizados os métodos analítico-sintético e dedutivo para interpretar e relacionar as informações científicas coletadas. A técnica de investigação empregada foi a revisão bibliográfica sistemática de literatura científica indexada em bases de dados internacionais como Scopus, Web of Science, ScienceDirect e PubMed. Como instrumento de coleta de dados utilizou-se uma matriz bibliográfica de análise documental, considerando informações provenientes de artigos científicos incluídos na bibliografia geral. Os resultados evidenciaram que *Asparagopsis taxiformis* e o 3-nitrooxipropanol apresentaram a maior eficácia antimetanogênica, enquanto taninos, óleos essenciais e lipídios demonstraram efeitos moduladores variáveis sobre a microbiota ruminal e o metabolismo do hidrogênio. Além disso, identificou-se que a eficácia dessas estratégias depende de fatores associados à composição da dieta, adaptação microbiana, período de suplementação e condições fisiológicas do animal. Conclui-se que a mitigação efetiva do metano entérico requer estratégias integradas voltadas à nutrição de precisão, modulação microbiana e sustentabilidade metabólica em sistemas pecuários modernos.

Palavras-chave: metano entérico, ruminantes, estratégias nutricionais, microbioma ruminal, mitigação antimetanogênica.

Introducción

El incremento sostenido de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) constituye uno de los principales desafíos ambientales y productivos asociados a los sistemas pecuarios modernos. Dentro de estos gases, el metano (CH_4) posee un potencial de calentamiento global significativamente superior al del dióxido de carbono, contribuyendo de manera importante al cambio climático antropogénico. La fermentación entérica de los rumiantes representa una de las principales fuentes biogénicas de CH_4 a nivel mundial, debido a la actividad metabólica de microorganismos ruminales especializados que utilizan hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2) para la formación de metano durante los procesos fermentativos anaerobios (Arndt et al., 2022; Beauchemin et al., 2022). Además de su impacto ambiental, la metanogénesis ruminal implica pérdidas energéticas equivalentes al 2–12 % de la energía bruta consumida por el animal, reduciendo potencialmente la eficiencia productiva de los sistemas ganaderos (Hristov et al., 2022).

La producción de metano entérico está estrechamente relacionada con la dinámica microbiana del ecosistema ruminal. Durante la fermentación de carbohidratos estructurales y no estructurales se generan ácidos grasos volátiles, CO_2 e hidrógeno metabólico, este último utilizado principalmente por arqueas metanogénicas para sintetizar CH_4 (Pereira et al., 2022). En este contexto, la modulación de las rutas metabólicas asociadas al flujo de hidrógeno representa actualmente uno de los enfoques más prometedores para reducir la metanogénesis sin comprometer la estabilidad fermentativa ruminal (Pressman & Kebreab, 2024). Asimismo, recientes investigaciones destacan que la composición y funcionalidad del microbioma ruminal desempeñan un papel determinante en la variabilidad de las emisiones de metano entre animales, dietas y sistemas de producción, sugiriendo que las estrategias nutricionales antimethanogénicas deben analizarse desde una perspectiva microbiana y ecofisiológica integral (Thacharodi et al., 2024).

Múltiples alternativas nutricionales han sido evaluadas con el objetivo de disminuir las emisiones entéricas de CH₄ mediante la modificación directa o indirecta de la fermentación ruminal. Entre las estrategias con mayor potencial destacan el uso de macroalgas marinas, especialmente *Asparagopsis taxiformis*, compuestos fitobioactivos como taninos y aceites esenciales, lípidos insaturados, nitratos y aditivos sintéticos como el 3-nitrooxipropanol (3-NOP) (Hristov, 2024). Diversos estudios han demostrado que algunas de estas estrategias pueden reducir significativamente las emisiones de metano al inhibir enzimas clave de las arqueas metanogénicas, modificar poblaciones microbianas específicas o redirigir el hidrógeno hacia rutas metabólicas alternativas más eficientes (Dijkstra et al., 2025; Wasson et al., 2022). En particular, el 3-NOP ha mostrado reducciones consistentes de CH₄ en bovinos lecheros y de carne mediante la inhibición de la metil-coenzima M reductasa, considerada una enzima esencial en la ruta final de la metanogénesis (Gastelen et al., 2020). De forma similar, las macroalgas rojas han despertado gran interés debido a la presencia de metabolitos halogenados capaces de disminuir drásticamente la producción de metano en condiciones in vivo e in vitro (Min et al., 2021).

Por otra parte, el uso de taninos condensados y otros compuestos fenólicos de origen vegetal ha demostrado efectos moduladores sobre la microbiota ruminal y la población protozoaria, contribuyendo a disminuir la disponibilidad de hidrógeno para las arqueas metanogénicas (Berça et al., 2023). Los aceites vegetales y lípidos ricos en ácidos grasos insaturados también han sido ampliamente estudiados debido a su capacidad para actuar como sumideros alternativos de hidrógeno durante los procesos de biohidrogenación ruminal (Hassanat & Benchaar, 2021). Sin embargo, la magnitud de respuesta de estas estrategias continúa mostrando alta variabilidad entre estudios, influenciada por factores como composición de la dieta, dosis de suplementación, adaptación microbiana, especie animal y sistema de producción (Pepeta et al., 2024).

De acuerdo a los avances científicos alcanzados, persisten importantes limitaciones relacionadas con la consistencia biológica, viabilidad económica y aplicabilidad práctica de muchas estrategias antimethanogénicas. Algunas alternativas pueden afectar negativamente la digestibilidad de la fibra, el consumo de materia seca o el rendimiento productivo cuando son utilizadas en concentraciones elevadas o durante periodos prolongados (Lileikis et al., 2023). Asimismo, existe heterogeneidad metodológica entre estudios respecto a técnicas de medición de metano, duración experimental y condiciones nutricionales, dificultando la comparación objetiva de resultados y la extrapolación hacia sistemas comerciales (Martins et al., 2024). De igual manera, recientes revisiones sugieren que la mitigación sostenible del metano entérico requiere enfoques integrados que consideren simultáneamente productividad animal, estabilidad del microbioma ruminal y sostenibilidad ambiental de largo plazo (Roques et al., 2024).

Con base a lo descrito anteriormente se formulan las siguientes preguntas de investigación: ¿cuáles son las estrategias nutricionales con mayor eficacia en la mitigación del metano entérico en rumiantes?, ¿qué mecanismos microbiológicos y fermentativos participan en la reducción de la metanogénesis ruminal?, y ¿cómo influyen estas estrategias sobre el desempeño productivo y la sostenibilidad de los sistemas pecuarios?

Para los autores Prado-Carpio, E. C., et al. (2025), quienes emiten la siguiente reflexión, “Un objetivo bien formulado debe ser específico, alcanzable y alineado con el nivel de profundidad exigido por el tipo de producción académica...” en consecuencia, el objetivo de la presente revisión fue analizar críticamente las principales alternativas nutricionales utilizadas para mitigar la emisión de metano entérico en rumiantes, enfatizando sus mecanismos de acción, eficacia antimethanogénica, efectos sobre la fermentación ruminal y repercusiones productivas en sistemas pecuarios sostenibles.

Metodología

Enfoque de la investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo con integración de elementos cuantitativos de carácter descriptivo-comparativo, debido a que permitió analizar críticamente la evidencia científica relacionada con las estrategias nutricionales utilizadas para mitigar la emisión de metano entérico en rumiantes, considerando sus mecanismos microbiológicos, fermentativos y productivos. Asimismo, se incorporaron elementos cuantitativos mediante la comparación de porcentajes de reducción de metano, niveles de inclusión dietética y efectos reportados sobre variables fermentativas y productivas en los diferentes estudios analizados.

Alcance de la investigación

El alcance de la investigación fue descriptivo-explicativo, debido a que recopiló, sistematizó e interpretó información científica relacionada con las principales alternativas antimethanogénicas empleadas en nutrición de rumiantes, incluyendo macroalgas, taninos, aceites esenciales, lípidos, nitratos y aditivos sintéticos. De igual manera, el estudio tuvo un alcance explicativo porque analizó los mecanismos bioquímicos y microbiológicos asociados a la reducción de la metanogénesis ruminal, así como las interacciones entre microbiota, fermentación y metabolismo del hidrógeno dentro del ecosistema ruminal.

Diseño de la investigación

El diseño metodológico correspondió a una investigación no experimental de tipo documental y revisión sistemática crítica, debido a que no se manipularon variables biológicas ni condiciones experimentales, sino que se analizaron resultados previamente reportados en investigaciones científicas indexadas. La investigación se fundamentó en el método analítico-sintético y deductivo. El método analítico permitió descomponer la información científica en categorías temáticas relacionadas con mecanismos antimethanogénicos, microbiota ruminal,

fermentación y estrategias nutricionales específicas; posteriormente, mediante el método sintético, la evidencia recopilada fue integrada para establecer relaciones entre eficacia de mitigación, sostenibilidad productiva y viabilidad biológica de las estrategias evaluadas. Paralelamente, el método deductivo permitió interpretar principios generales relacionados con fermentación ruminal y emisiones entéricas para posteriormente analizar su aplicación específica en sistemas de producción de rumiantes.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se empleó la revisión bibliográfica sistemática de literatura científica indexada. La búsqueda de información se realizó en bases de datos internacionales de alto impacto científico como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed y SpringerLink. Para la estrategia de búsqueda se utilizaron combinaciones booleanas de palabras clave como “enteric methane mitigation”, “ruminants”, “feed additives”, “seaweed”, “3-NOP”, “essential oils”, “condensed tannins”, “rumen microbiome” y “methanogenesis”. La selección bibliográfica priorizó artículos científicos publicados entre 2020 y 2025, pertenecientes principalmente a revistas indexadas en Scopus y Web of Science de los cuartiles Q1 y Q2 en las áreas de nutrición animal, microbiología ruminal y sostenibilidad pecuaria.

Se empleó una matriz bibliográfica de análisis documental para la recopilación y organización de información, en la cual se registraron variables relacionadas con autor, año de publicación, tipo de estrategia nutricional, especie animal evaluada, mecanismo antimethanogénico, porcentaje de reducción de CH₄, efectos sobre fermentación ruminal, impacto productivo y limitaciones biológicas reportadas en cada investigación. Posteriormente, la información fue clasificada en categorías temáticas para facilitar el análisis comparativo e interpretación científica de la evidencia recopilada.

Estadística utilizada

La investigación utilizó estadística descriptiva de apoyo documental, empleándose comparaciones porcentuales y descriptivas de los resultados reportados en los estudios seleccionados, especialmente en variables asociadas a reducción de emisiones de metano, eficiencia fermentativa y respuesta productiva animal. No se aplicó estadística inferencial ni meta-análisis cuantitativo formal debido a la heterogeneidad metodológica existente entre los estudios revisados respecto a diseño experimental, especies animales, composición dietética y métodos de medición de metano.

(Redacción en Tiempo Pasado)

Los materiales y métodos deben describirse con suficientes detalles para que otros puedan reproducirse y basarse en los resultados publicados. Tenga en cuenta que la publicación de su manuscrito implica que debe poner a disposición de los lectores todos los materiales, datos, código informático y protocolos asociados con la publicación. Los nuevos métodos y protocolos deben describirse en detalle, mientras que los métodos bien establecidos pueden describirse brevemente y citarse adecuadamente.

En este apartado escribirá de forma clara todos los procesos, experimentos, pasos, técnicas realizadas en su investigación. Es muy importante que describa de forma precisa y clara, con el objetivo que otros lectores puedan replicar su estudio. En el mayor de los casos si este apartado no es claro, existe una alta probabilidad de rechazo para su documento. Use tablas, diagramas, figuras, formulas...

Incluirá apartados de diseño, tipo, nivel y modalidad de investigación, métodos, procedimientos y técnicas de investigación. Se define la población o grupo de estudio, así como los criterios de inclusión, exclusión y eliminación. Especificar aspectos éticos de la investigación, como autorización de instituciones, consejos científicos, comité de ética, consentimiento informado.

Discusión

Modulación de la metanogénesis ruminal y metabolismo del hidrógeno

La mitigación del metano entérico en rumiantes constituye actualmente uno de los principales desafíos científicos dentro de la nutrición animal sostenible, debido a la estrecha interacción existente entre fermentación ruminal, metabolismo microbiano y eficiencia energética del hospedador. La producción de CH₄ depende fundamentalmente de la disponibilidad de hidrógeno metabólico generado durante la fermentación anaerobia de carbohidratos estructurales y no estructurales, siendo las arqueas metanogénicas los principales microorganismos responsables de utilizar H₂ y CO₂ para sintetizar metano (Pereira et al., 2022). En este contexto, diversos estudios coinciden en que la reducción efectiva de la metanogénesis requiere modificar las rutas fermentativas asociadas al flujo de hidrógeno dentro del ecosistema ruminal, promoviendo mecanismos alternativos capaces de disminuir la actividad metanogénica sin comprometer la estabilidad digestiva del rumen (Pressman & Kebreab, 2024; Van Lingen et al., 2021).

Desde una perspectiva microbiológica, las investigaciones recientes han demostrado que las estrategias antimethanogénicas no solo afectan a las arqueas metanogénicas, sino también a bacterias fibrotróficas, protozoos y microorganismos acetogénicos involucrados en el equilibrio fermentativo ruminal (Thacharodi et al., 2024). De acuerdo con Dijkstra et al. (2025), la respuesta biológica frente a los aditivos nutricionales depende de múltiples factores asociados a composición dietética, adaptación microbiana, disponibilidad de sustrato fermentable y capacidad de redistribución metabólica del hidrógeno. Esta complejidad explica parcialmente la heterogeneidad observada entre estudios *in vivo* e *in vitro*, especialmente cuando se comparan diferentes especies animales, sistemas de alimentación y periodos de suplementación. Asimismo, Pressman y Kebreab (2024) sostienen que la comprensión mecanística del microbioma ruminal será determinante para desarrollar modelos predictivos

más precisos capaces de optimizar simultáneamente productividad animal y mitigación de emisiones.

Otro aspecto relevante es que la disminución de la metanogénesis puede modificar la relación acetato:propionato dentro del rumen, favoreciendo rutas fermentativas más eficientes desde el punto de vista energético. En consecuencia, algunos aditivos no solo disminuyen emisiones de CH₄, sino que también pueden mejorar el aprovechamiento energético de la dieta cuando la redistribución metabólica del hidrógeno ocurre de forma eficiente (Pereira et al., 2022). Sin embargo, la magnitud de esta respuesta continúa siendo variable entre investigaciones, lo cual evidencia que el ecosistema ruminal responde de manera altamente dinámica frente a las intervenciones nutricionales.

Macroalgas y compuestos antimethanogénicos de alta eficacia

Las macroalgas marinas, particularmente *Asparagopsis taxiformis*, representan una de las estrategias con mayor eficacia antimethanogénica reportada hasta la actualidad. Diversos autores coinciden en que los metabolitos halogenados presentes en esta macroalga, especialmente el bromoformo, actúan inhibiendo directamente la enzima metil-coenzima M reductasa, considerada esencial en la etapa final de la metanogénesis ruminal (Wasson et al., 2022; Ahmad et al., 2025). Estudios recientes han reportado reducciones superiores al 70 % en emisiones de CH₄, posicionando a las macroalgas rojas como una de las herramientas nutricionales más prometedoras para sistemas pecuarios bajos en carbono (Min et al., 2021; Liu et al., 2025).

Sin embargo, persisten importantes limitaciones relacionadas con estabilidad química, variabilidad composicional, seguridad toxicológica y escalabilidad productiva. Ahmad et al. (2025) señalan que las concentraciones de compuestos halogenados pueden variar considerablemente según condiciones ambientales, procesamiento y almacenamiento de la biomasa algal, afectando la consistencia de respuesta antimethanogénica. Del mismo modo,

Wanapat et al. (2024) advierten que el uso prolongado de algunas macroalgas podría modificar parámetros fermentativos y digestivos cuando se utilizan niveles elevados de inclusión dietética. Estas observaciones sugieren que, aunque las macroalgas representan una alternativa altamente eficiente, aún se requieren estudios orientados a determinar dosis seguras, estabilidad metabólica y viabilidad económica en condiciones comerciales.

Adicionalmente, Liu et al. (2025) enfatizan que la producción masiva de biomasa algal para uso pecuario todavía enfrenta desafíos relacionados con costos de cultivo, disponibilidad de infraestructura y sostenibilidad ambiental de los sistemas de producción marina. En consecuencia, aunque las macroalgas poseen elevada eficacia antimethanogénica, su incorporación a gran escala dependerá de avances tecnológicos que permitan estabilizar calidad composicional y reducir costos operativos. A pesar de estas limitaciones, el consenso científico actual considera que las macroalgas representan una de las líneas de investigación con mayor potencial para programas globales de descarbonización pecuaria.

Taninos, aceites esenciales y metabolitos vegetales

Los compuestos fitobioactivos derivados de plantas han mostrado un creciente interés científico debido a su capacidad para modular selectivamente la microbiota ruminal y disminuir la disponibilidad de hidrógeno para las arqueas metanogénicas. Entre ellos, los taninos condensados destacan por reducir la población protozoaria y modificar procesos fermentativos asociados a la degradación proteica y producción de metano (Berça et al., 2023). Cardoso et al. (2021) reportaron que los taninos provenientes de plantas tropicales generan efectos antimethanogénicos variables dependiendo de su estructura química, concentración dietética y composición basal de la dieta.

Los taninos pueden disminuir significativamente las emisiones de CH₄, sin embargo, diversos estudios advierten que niveles excesivos podrían afectar negativamente la digestibilidad de la fibra y el consumo voluntario de materia seca (Lileikis et al., 2023). Esta

dualidad evidencia que la eficacia de los fitocompuestos depende de un delicado equilibrio entre modulación microbiana y mantenimiento de la eficiencia fermentativa. Además, Berça et al. (2023) observaron que la respuesta antimethanogénica de los taninos suele ser más consistente en sistemas con dietas basadas en forraje, probablemente debido a mayores interacciones con procesos fibrotróficos ruminales.

Asímismo, los aceites esenciales y metabolitos secundarios vegetales han demostrado capacidad inhibitoria sobre ciertas poblaciones microbianas productoras de hidrógeno y metano; sin embargo, su efectividad continúa mostrando alta variabilidad experimental (Miller et al., 2023). Algunos autores sugieren que la adaptación microbiana frente a compuestos bioactivos puede reducir progresivamente la eficacia antimethanogénica durante suplementaciones prolongadas, especialmente cuando se utilizan dosis subóptimas o mezclas fitoquímicas inestables (Lileikis et al., 2023).

Por otra parte, la suplementación con lípidos y aceites vegetales ricos en ácidos grasos insaturados constituye otra estrategia ampliamente estudiada debido a que la biohidrogenación ruminal actúa como sumidero alternativo de hidrógeno. Hassanat y Benchaar (2021) observaron que la inclusión progresiva de aceite de linaza redujo la producción de metano en vacas lecheras, aunque la magnitud de respuesta estuvo influenciada por el perfil lipídico de la dieta y la adaptación fermentativa del rumen. En conjunto, estos hallazgos sugieren que los compuestos vegetales poseen importante potencial antimethanogénico, aunque sus efectos suelen ser menos consistentes que los observados con aditivos sintéticos especializados.

3-nitrooxipropanol y estrategias sintéticas emergentes

El 3-nitrooxipropanol (3-NOP) ha sido identificado como uno de los inhibidores sintéticos más consistentes y científicamente validados para reducir emisiones entéricas de metano. Su mecanismo de acción se basa en la inhibición específica de la metil-coenzima M reductasa, interfiriendo directamente en la ruta metabólica terminal de la metanogénesis

(Gastelen et al., 2020). A diferencia de otros aditivos nutricionales, el 3-NOP ha mostrado reducciones relativamente estables en diferentes sistemas productivos, incluyendo bovinos lecheros y de carne (Gruninger et al., 2022).

Diversos estudios coinciden en que la suplementación con 3-NOP disminuye significativamente la producción de CH₄ sin afectar de manera severa parámetros productivos como consumo, digestibilidad o producción láctea (Gastelen et al., 2024; Hristov et al., 2025). No obstante, Van Lingen et al. (2021) observaron incrementos compensatorios en emisiones de hidrógeno gaseoso, indicando que parte del H₂ metabólico no es completamente redirigido hacia rutas fermentativas alternativas. Estos resultados evidencian que, aunque el 3-NOP representa una de las estrategias más prometedoras para mitigación inmediata de CH₄, aún existen interrogantes relacionadas con adaptación microbiana a largo plazo y dinámica global del metabolismo ruminal.

De igual manera, Gruninger et al. (2022) reportaron modificaciones importantes en la composición microbiana del rumen tras suplementación con 3-NOP, particularmente sobre comunidades asociadas a fermentación fibrotrófica y metabolismo energético. Este aspecto resulta relevante debido a que cambios excesivos sobre el ecosistema microbiano podrían alterar digestibilidad y eficiencia fermentativa cuando la suplementación se mantiene durante periodos prolongados. Asimismo, Hristov (2024) destaca que la eficacia del 3-NOP puede verse influenciada por composición de la dieta, frecuencia de suministro y nivel de fermentabilidad ruminal, sugiriendo que su aplicación práctica deberá ajustarse a las características específicas de cada sistema productivo.

Impacto productivo y sostenibilidad pecuaria

Uno de los aspectos más relevantes dentro de la mitigación nutricional del metano es garantizar que las estrategias implementadas no comprometan la productividad animal ni la sostenibilidad económica de los sistemas pecuarios. Arndt et al. (2022) sostienen que la

reducción global de emisiones de CH₄ en rumiantes constituye un componente fundamental para alcanzar metas internacionales de mitigación climática; sin embargo, enfatizan que las tecnologías aplicadas deben mantener simultáneamente eficiencia productiva y seguridad alimentaria.

En este sentido, diversos meta-análisis evidencian que la respuesta productiva frente a estrategias antimethanogénicas depende considerablemente del tipo de aditivo, nivel de inclusión y sistema de alimentación utilizado (Pepeta et al., 2024). Martins et al. (2024) observaron que algunos aditivos presentan mayor eficacia cuando son utilizados en dietas con alta proporción de concentrado, mientras que otros muestran mejores respuestas en sistemas basados en forraje. Del mismo modo, Roques et al. (2024) indican que la sostenibilidad futura de la producción de rumiantes dependerá no solo de reducir emisiones, sino también de mantener eficiencia alimenticia, resiliencia productiva y estabilidad del microbioma ruminal.

La creciente integración entre nutrición de precisión, microbiología ruminal y sostenibilidad ambiental ha impulsado el desarrollo de nuevas estrategias basadas en manipulación selectiva del microbioma y modelado mecanístico de fermentación ruminal (Pressman & Kebreab, 2024). En consecuencia, la mitigación del metano ya no debe interpretarse únicamente como una herramienta ambiental, sino como parte integral de sistemas pecuarios ecoeficientes orientados a maximizar conversión energética y reducir pérdidas metabólicas. Esta visión coincide con lo reportado por Xie et al. (2025), quienes consideran que la futura sostenibilidad pecuaria dependerá de integrar estrategias antimethanogénicas con herramientas de nutrición de precisión y monitoreo metabólico en tiempo real.

Limitaciones y perspectivas futuras

Persisten limitaciones importantes relacionadas con la heterogeneidad experimental, adaptación microbiana y viabilidad comercial de las estrategias antimethanogénicas evaluadas hasta la actualidad. Xie et al. (2025) indican que numerosas investigaciones presentan

variaciones metodológicas asociadas a técnicas de medición de CH₄, duración de los periodos experimentales, composición de las dietas y estado fisiológico de los animales, lo que dificulta la estandarización y comparación objetiva de resultados entre estudios. Asimismo, Roques et al. (2024) sostienen que la sostenibilidad de largo plazo dependerá de desarrollar estrategias capaces de integrarse eficientemente a sistemas de producción intensivos y extensivos sin comprometer digestibilidad, metabolismo ruminal ni calidad de los productos de origen animal. Bajo esta perspectiva, las futuras líneas de investigación deberán orientarse hacia herramientas de nutrigenómica, metagenómica ruminal, modelado predictivo y estrategias sinérgicas combinadas que permitan optimizar simultáneamente reducción de emisiones, eficiencia fermentativa y productividad animal (Dijkstra et al., 2025; Hristov, 2024).

Finalmente, la evidencia científica analizada sugiere que ninguna estrategia individual constituye una solución universal para la mitigación del metano entérico. Por el contrario, los mayores avances probablemente surgirán de enfoques integrados que combinen modulación microbiológica, nutrición de precisión y sostenibilidad metabólica dentro de sistemas pecuarios adaptados a las exigencias ambientales y productivas futuras.

Conclusión

En relación con la primera pregunta de investigación, referente a cuáles son las estrategias nutricionales con mayor eficacia en la mitigación del metano entérico en rumiantes, la evidencia científica analizada permitió concluir que *Asparagopsis taxiformis* y el 3-nitrooxipropanol (3-NOP) constituyen las alternativas con mayor potencial antimetanogénico reportado en la literatura reciente, alcanzando reducciones sustanciales de las emisiones de CH₄ superiores a las observadas con otros aditivos nutricionales. Asimismo, los taninos condensados, aceites esenciales, lípidos insaturados y otros extractos vegetales bioactivos demostraron capacidad de mitigación complementaria, aunque con niveles de eficacia más

variables y dependientes de la dosis, la composición de la dieta y las condiciones de producción.

Respecto a la segunda pregunta de investigación, relacionada con los mecanismos microbiológicos y fermentativos que participan en la reducción de la metanogénesis ruminal, los resultados evidenciaron que la disminución de las emisiones de metano ocurre principalmente mediante la inhibición directa de arqueas metanogénicas, la alteración de enzimas involucradas en la síntesis de CH₄ y la redistribución metabólica del hidrógeno ruminal hacia rutas fermentativas alternativas, particularmente aquellas asociadas con la producción de propionato. Adicionalmente, diversos aditivos ejercieron efectos moduladores sobre la estructura y actividad del microbioma ruminal, reduciendo la disponibilidad de sustratos utilizados por los microorganismos metanogénicos y mejorando la eficiencia de utilización de la energía fermentativa.

En cuanto a la tercera pregunta de investigación, referente a la influencia de estas estrategias sobre el desempeño productivo y la sostenibilidad de los sistemas pecuarios, la evidencia recopilada demostró que la reducción de metano puede traducirse en una utilización más eficiente de la energía dietaria, favoreciendo indicadores productivos como la eficiencia alimenticia, la ganancia de peso y la producción de leche, siempre que las estrategias sean implementadas bajo niveles adecuados de suplementación. No obstante, también se identificó que dosis excesivas o aplicaciones prolongadas de determinados aditivos pueden afectar la digestibilidad, la estabilidad fermentativa y el equilibrio microbiano del rumen. Por lo tanto, la sostenibilidad de estas tecnologías depende de alcanzar un equilibrio entre mitigación ambiental, salud ruminal y productividad animal.

De manera integradora, la revisión permitió cumplir satisfactoriamente el objetivo de investigación al analizar críticamente las principales estrategias nutricionales utilizadas para mitigar el metano entérico en rumiantes, identificando su eficacia biológica, mecanismos de

acción y repercusiones productivas. La evidencia científica sugiere que las estrategias más prometedoras para el futuro deberán combinar herramientas de nutrición de precisión, modulación dirigida del microbioma ruminal y evaluación integral de sostenibilidad, con el fin de maximizar simultáneamente la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la eficiencia productiva de los sistemas pecuarios.

Referencias Bibliográficas

- Ahmad, I., Rawnsley, R. P., Bowman, J. P., & Omede, A. A. (2025). Graduate student literature review: Limitations in feeding red seaweed *Asparagopsis* species for enteric methane mitigation in ruminants. *Journal of Dairy Science*, 108(12), 13270–13288. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-26915>.
- Almeida, A., Hegarty, R., & Cowie, A. (2021). Meta-analysis quantifying the potential of dietary additives and rumen modifiers for methane mitigation in ruminant production systems. *Animal Nutrition*, 7(4), 1219–1230. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.09.005>.
- Arndt, C., Hristov, A. N., Price, W. J., McClelland, S. C., Pelaez, A. M., Cueva, S. F., Oh, J., Dijkstra, J., Bannink, A., Bayat, A. R., Crompton, L. A., Eugène, M. A., Enahoro, D., Kebreab, E., Kreuzer, M., McGee, M., Martin, C., Newbold, C. J., Reynolds, C. K., & Yu, Z. (2022). Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5 °C target by 2030 but not 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(20), e2111294119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2111294119>.
- Beauchemin, K. A., Ungerfeld, E. M., Abdalla, A. L., Álvarez, C., Arndt, C., Becquet, P., Benchaar, C., Berndt, A., Mauricio, R. M., McAllister, T. A., Oyhantçabal, W., Salami, S. A., Shalloo, L., Sun, Y., Tricarico, J. M., Uwizeye, A., De Camillis, C., Bernoux, M., Robinson, T., & Kebreab, E. (2022). Invited review: Current enteric methane mitigation options. *Journal of Dairy Science*, 105(12), 9297–9330. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22091>.
- Berça, A. S., Tedeschi, L. O., da Silva Cardoso, A., & Reis, R. A. (2023). Meta-analysis of the relationship between dietary condensed tannins and methane emissions by cattle. *Animal Feed Science and Technology*, 295, 115564. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115564>.
- Cardoso, E. C., Aranda, E. M., Robles, L. A., Castelán, O. A., Chay, A. J., Foggi, G., Ángeles, J. O., Vargas, E. M., & González, M. S. (2021). Effect of tannins from tropical plants on methane production from ruminants: A systematic review. *Veterinary and Animal Science*, 14, 100214. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2021.100214>.
- Dijkstra, J., Bannink, A., Congio, G. F. S., Ellis, J. L., Eugène, M., Garcia, F., Niu, M., Vibart, R. E., Yáñez-Ruiz, D. R., & Kebreab, E. (2025). Feed additives for methane mitigation: Modeling the impact of feed additives on enteric methane emission of ruminants—

- Approaches and recommendations. *Journal of Dairy Science*, 108(1), 356–374. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25049>.
- Fouts, J. Q., Honan, M., & Hristov, A. N. (2022). Enteric methane mitigation interventions. *Translational Animal Science*, 6(2), txac041. <https://doi.org/10.1093/tas/txac041>.
- Gastelen, S. van, Burgers, E. E. A., Dijkstra, J., Mol, R. de, Muizelaar, W., Walker, N., & Bannink, A. (2024). Long-term effects of 3-nitrooxypropanol on methane emission and milk production characteristics in Holstein-Friesian dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 107(8), 5556–5573. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24198>.
- Gastelen, S. van, Dijkstra, J., Binnendijk, G., Duval, S. M., Heck, J. M. L., Kindermann, M., Zandstra, T., & Bannink, A. (2020). 3-Nitrooxypropanol decreases methane emissions and increases hydrogen emissions of early lactation dairy cows, with associated changes in nutrient digestibility and energy metabolism. *Journal of Dairy Science*, 103(9), 8074–8093. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17936>.
- Gruninger, R. J., Zhang, X. M., Smith, M. L., Kung, L., Vyas, D., McGinn, S. M., Kindermann, M., Wang, M., Tan, Z. L., & Beauchemin, K. A. (2022). Application of 3-nitrooxypropanol and canola oil to mitigate enteric methane emissions of beef cattle results in distinctly different effects on the rumen microbial community. *Animal Microbiome*, 4(1), 35. <https://doi.org/10.1186/s42523-022-00179-8>.
- Hassanat, F., & Benchaar, C. (2021). Corn silage-based diet supplemented with increasing amounts of linseed oil: Effects on methane production, rumen fermentation, nutrient digestibility, nitrogen utilization, and milk production of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 104(5), 5375–5390. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18853>.
- Hristov, A. N. (2024). Invited review: Advances in nutrition and feed additives to mitigate enteric methane emissions. *Journal of Dairy Science*, 107(7), 4129–4146. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24440>.
- Hristov, A. N., Bannink, A., Battelli, M., Belanche, A., Cajarville, C., Fernandez-Turren, G., Garcia, F., Jonker, A., Kenny, D. A., Lund, P., Meale, S. J., Muñoz, C., Pacheco, D., Ramin, M., Schwarm, A., Stergiadis, S., Ungerfeld, E. M., van Gastelen, S., Yáñez-Ruiz, D. R., & Waters, S. M. (2025). Feed additives for methane mitigation: Recommendations for testing enteric methane-mitigating feed additives in ruminant studies. *Journal of Dairy Science*, 108(1), 322–355. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25050>.
- Hristov, A. N., Melgar, A., Wasson, D., & Arndt, C. (2022). Symposium review: Effective nutritional strategies to mitigate enteric methane in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 105(10), 8543–8557. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21398>.
- Lileikis, T., Nainienė, R., Bliznikas, S., & Uchockis, V. (2023). Dietary ruminant enteric methane mitigation strategies: Current findings, potential risks and applicability. *Animals*, 13(16), 2586. <https://doi.org/10.3390/ani13162586>.

- Liu, Y., Zhou, M., Diao, Q., Ma, T., & Tu, Y. (2025). Seaweed as a feed additive to mitigate enteric methane emissions in ruminants: Opportunities and challenges. *Journal of Integrative Agriculture*, 24(4), 1327–1341. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.09.036>.
- Martins, L. F., Ribeiro, G. O., Chaves, A. V., & McAllister, T. A. (2024). Effects of dose, dietary nutrient composition, and supplementation period on methane-mitigating strategies in dairy cattle: A meta-analysis. *Journal of Dairy Science*, 107(12), 10432–10455. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25118>.
- Min, B. R., Parker, D., Brauer, D., Waldrip, H., Lockard, C., Hales, K., Akbay, A., & Augyte, S. (2021). The role of seaweed as a potential dietary supplementation for enteric methane mitigation in ruminants: Challenges and opportunities. *Animal Nutrition*, 7(4), 1371–1387. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.10.003>.
- Pepeta, B., Hassen, A., & Tesfamariam, E. (2024). Quantifying the impact of different dietary rumen modulating strategies on enteric methane emission and productivity in ruminant livestock: A meta-analysis. *Animals*, 14(5), 763. <https://doi.org/10.3390/ani14050763>.
- Pereira, A. M., de Lurdes Nunes Enes Dapkevicius, M., & Borba, A. E. S. (2022). Alternative pathways for hydrogen sink originated from the ruminal fermentation of carbohydrates: Which microorganisms are involved in lowering methane emission? *Animal Microbiome*, 4(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s42523-021-00153-w>.
- Prado-Carpio, E. C., Pinargote-Pinargote, H. M., Serrano-Valdiviezo, M. P., Minaya-Macías, M.M., & Navarrete-Almeida, M. S. (2025). Guía para la escritura académica y la divulgación de conocimientos. Editorial Erevna Ciencia Ediciones, Ecuador. <https://doi.org/10.70171/dwjsjb71>
- Pressman, E. M., & Kebreab, E. (2024). A review of key microbial and nutritional elements for mechanistic modeling of rumen fermentation in cattle under methane inhibition. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1488370>.
- Purba, R. A. P., Kim, E. T., Lee, S. S., & Kim, C. H. (2025). Meta-analysis of dietary interventions for enteric methane mitigation in ruminants. *Veterinary Sciences*, 12(4), 372. <https://doi.org/10.3390/vetsci12040372>.
- Roques, S., Martin, C., Eugène, M., & Morgavi, D. P. (2024). Recent advances in enteric methane mitigation and the long road to sustainable ruminant production. *Annual Review of Animal Biosciences*, 12, 231–256. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-021022-024931>.
- Sun, J., Zhao, G., & Li, M. (2023). Using nutritional strategies to mitigate ruminal methane emissions from ruminants. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 10(4), 620–635. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2023504>.
- Thacharodi, A., Hassan, S., Ahmed, Z., Singh, P., Maqbool, M., Meenatchi, R., Pugazhendhi, A., & Sharma, A. (2024). The ruminant gut microbiome versus enteric methane emission: Essential microbes may help mitigate the global methane crisis. *Environmental Research*, 252, 119661. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119661>.

- Van Lingen, H. J., Fadel, J. G., Yáñez-Ruiz, D. R., Kindermann, M., & Kebreab, E. (2021). Inhibited methanogenesis in the rumen of cattle: Microbial metabolism in response to supplemental 3-nitrooxypropanol and nitrate. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.705613>.
- Wanapat, M., Prachumchai, R., Dagaew, G., Matra, M., Phupaboon, S., Sommai, S., & Suriyapha, C. (2024). Potential use of seaweed as a dietary supplement to mitigate enteric methane emission in ruminants. *Science of the Total Environment*, 931, 173015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173015>.
- Wasson, D. E., Yarish, C., & Hristov, A. N. (2022). Enteric methane mitigation through *Asparagopsis taxiformis* supplementation and potential algal alternatives. *Frontiers in Animal Science*, 3, 999338. <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.999338>.
- Xie, X., Cao, Y., Li, Q., Li, Q., Yang, X., Wang, R., Zhang, X., Tan, Z., Lin, B., & Wang, M. (2025). Mitigating enteric methane emissions: An overview of methanogenesis, inhibitors and future prospects. *Animal Nutrition*, 21, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2025.02.001>.