



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2026,
Volumen 10, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i4

ADITIVOS NUTRICIONALES PARA LA MITIGACIÓN DEL METANO ENTÉRICO EN BOVINOS: EFICACIA COMPARATIVA, PRODUCTIVIDAD Y RIESGOS (2021 2026)

**NUTRITIONAL ADDITIVES FOR THE MITIGATION OF
ENTERIC METHANE IN CATTLE: COMPARATIVE EFFICACY,
PRODUCTIVITY AND RISKS (2021-2026)**

M.Sc. Beatriz del Pilar Colter Apaza

Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

M.Sc. Luz Elena Arevalo Rioja

Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

M.Sc. Uber Joel Plasencia Ruiz

Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

M.Sc. Benito Bautista Espinoza

Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

Ing. Rocío Jeanett Díaz Julián

Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i4.25666

Aditivos nutricionales para la mitigación del metano entérico en bovinos: eficacia comparativa, productividad y riesgos (2021 2026)

M.Sc. Beatriz del Pilar Colter Apaza ¹bcolter@unprg.edu.pe<https://orcid.org/0000-0001-8388-0098>Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Perú**M.Sc. Luz Elena Arevalo Rioja**larevalo@unprg.edu.pe<https://orcid.org/0000-0002-0652-6391>Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Perú**M.Sc. Uber Joel Plasencia Ruiz**uplasenciar@unprg.edu.pe<https://orcid.org/0000-0002-0754-5316>Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Perú**M.Sc. Benito Bautista Espinoza**bbautistae@unprg.edu.pe<https://orcid.org/0000-0002-0510-5042>Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Perú**Ing. Rocío Jeanett Díaz Julián**rdiazj@unprg.edu.pe<https://orcid.org/0009-0009-4750-7160>Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Perú

RESUMEN

Esta revisión sistemática analizó los Aditivos nutricionales para la mitigación del metano entérico en bovinos: eficacia comparativa, productividad y riesgos 2021 2026. Se aplicaron criterios metodológicos rigurosos de acuerdo con la metodología PRISMA, teniendo en cuenta 34 estudios obtenidos de bases académicas como Scopus, ScieceDirect y Dimensions. Los resultados revelaron que los inhibidores directos de la metanogénesis, específicamente el 3-nitrooxipropanol (3-NOP) y los análogos de halometano como el bromoformo (*Asparagopsis* spp.), constituyen las herramientas más potentes, logrando reducciones de metano de entre el 31% y el 94% en sistemas intensivos. Sin embargo, la eficacia disminuye drásticamente al 24% en condiciones de pastoreo, evidenciando limitaciones por la forma de entrega y estabilidad del compuesto. Se identificaron riesgos para la salud animal y la productividad, tales como la caída del 13.2% en el consumo de materia seca con dosis altas de 3-NOP y una severa depresión de la grasa láctea inducida por aceites vegetales insaturados. El estudio demostró una mayor concentración de la investigación en sistemas de alimentación estabulados (TMR) y el uso de inhibidores enzimáticos específicos, resaltando un vacío en la validación de estas tecnologías para sistemas de pastoreo extensivo y el aprovechamiento de subproductos locales ricos en taninos y saponinas.

Palabras clave: Metano entérico; aditivos nutricionales; 3-nitrooxipropanol; *Asparagopsis*; productividad bovina

¹ Autor principal.

Correspondencia: bcolter@unprg.edu.pe

Nutritional additives for the mitigation of enteric methane in cattle: comparative efficacy, productivity and risks (2021-2026)

ABSTRACT

This systematic review analyzed nutritional additives for enteric methane mitigation in cattle: comparative efficacy, productivity, and risks (2021–2026). Rigorous methodological criteria were applied according to the PRISMA methodology, considering 34 studies obtained from academic databases such as Scopus, ScienceDirect, and Dimensions. The results revealed that direct methanogenesis inhibitors, specifically 3-nitrooxypropanol (3-NOP) and halomethane analogs such as bromoform (*Asparagopsis* spp.), are the most potent tools, achieving methane reductions of between 31% and 94% in intensive systems. However, efficacy drops drastically to 24% under grazing conditions, highlighting limitations related to the delivery method and the compound's stability. Risks to animal health and productivity were identified, such as a 13.2% decrease in dry matter intake with high doses of 3-NOP and severe depression of milk fat induced by unsaturated vegetable oils. The study demonstrated a greater concentration of research on confined feeding systems (CFS) and the use of specific enzyme inhibitors, highlighting a gap in the validation of these technologies for extensive grazing systems and the utilization of local byproducts rich in tannins and saponins.

Keywords: Enteric methane; nutritional additives; 3-nitrooxypropanol; *Asparagopsis*; bovine productivity

*Artículo recibido 20 junio 2026
Aceptado para publicación: 20 julio 2026*



INTRODUCCIÓN

La ganadería bovina mundial enfrenta el reto crítico de satisfacer una demanda creciente de proteína animal, proyectada a incrementarse sustancialmente para alimentar a una población global de 10200 millones de personas en el año 2100 (Waters et al., 2025). No obstante, una parte considerable de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) causadas por el hombre provienen de la producción bovina. En este caso el metano entérico (CH_4), que se produce a través de la fermentación ruminal representa entre el 14.5% y el 17% de las emisiones globales de origen agrícola. El CH_4 es un potente gas de efecto invernadero con una capacidad para calentar el planeta 28 veces mayor que el dióxido de carbono en un plazo de 100 años (Garcia et al., 2022).

Desde una perspectiva zootecnista, la metanogénesis no solo tiene un impacto climático, sino que constituye una ineficiencia metabólica que representa una pérdida del 2% al 12% de la energía bruta consumida por el animal (Alecrim et al., 2024; Avilés-Nieto et al., 2023; Garcia et al., 2022; Waters et al., 2025). La implementación de estrategias efectivas y seguras para mitigar los sistemas productivos reales, se ha convertido en una prioridad para la sostenibilidad del sector ganadero debido a compromisos internacionales relacionados con el clima, como el Global Methane Pledge, que tiene como objetivo disminuir las emisiones de metano en un 30% para el 2030 (Dorca-Preda et al., 2024).

La investigación sobre estrategias de mitigación ha sido intensiva durante las últimas dos décadas, consolidando a los aditivos nutricionales como la vía de intervención con mayor aplicabilidad inmediata al actuar directamente sobre el proceso metanogénico o modificar el ecosistema ruminal (Waters et al., 2025). Meta-análisis globales basados en investigaciones in vivo desarrolladas entre 2020 y 2023 han evaluado la eficacia de diversos aditivos y dietas en múltiples países. Estos estudios identifican al 3-nitrooxipropanol (3-NOP) y a las algas rojas (*Asparagopsis* spp) como los inhibidores directos más consistentes hasta la fecha. No obstante, gran parte de la síntesis científica actual se centra en rumiantes de manera general (incluyendo ovinos y caprinos), lo que limita la precisión de las recomendaciones específicas para la ganadería bovina de leche y carne.

Para ello, la revisión se rige por la siguiente pregunta PICO: ¿Cómo influyen los aditivos nutricionales en la mitigación del metano entérico y la productividad de los bovinos?

A pesar del volumen de estudios primarios, la evidencia científica publicada entre 2021 y 2026 es heterogénea y, en ocasiones, contradictoria respecto a la persistencia de la eficacia de los aditivos, su impacto real en la productividad bajo condiciones de campo y los riesgos potenciales para la salud animal.

Persiste un vacío de sistematización que integre comparativamente el perfil de eficacia antimetanogénica con los co-beneficios productivos y los riesgos de largo plazo, como la adaptación microbiana y la presencia de residuos químicos en alimentos bajo un enfoque PRISMA 2020 estandarizado. Además, existe una subrepresentación crítica de estudios en sistemas semi-intensivos y regiones tropicales, lo que dificulta la toma de decisiones basada en evidencia para productores fuera de sistemas de confinamiento total.

En respuesta a esta necesidad, la presente investigación tiene como objetivo general comparar cuantitativamente y cualitativamente la eficacia, co-beneficios productivos y riesgos de los principales aditivos nutricionales para mitigar CH₄ entérico en bovinos a escala global.

METODOLOGÍA

La revisión sistemática se desarrolló con un enfoque cuantitativo y cualitativo, siguiendo la metodología PRISMA 2020 y registrándose previamente en Open Science Framework (OSF). Se incluyeron artículos publicados entre 2021 y 2026, revisados por pares, con acceso al texto completo, escritos en inglés, español o portugués y relacionados con los aditivos nutricionales para la mitigación del metano entérico en bovinos. Asimismo, se excluyeron documentos duplicados, de baja calidad, con información incompleta, sin acceso abierto o que no guardaban relación con el tema de estudio, obteniéndose finalmente los artículos seleccionados mediante el proceso de filtrado mostrado en la Figura 1.

Se examinaron varias bases de datos para ver si había investigaciones sobre el tema, como para buscar información en Scopus, ScieceDirect y Dimensions, se emplearon las siguientes palabras: Metano entérico, aditivos nutricionales, 3-nitrooxipropanol, Asparagopsis, productividad bovina, bromoformo, sostenibilidad climática, fermentación ruminal, se emplearon fórmulas booleanas con conectores AND/OR.

Scopus:

(TITLE-ABS-KEY ((cattle OR bovine* OR "beef cattle" OR "dairy cow*" OR "dairy cattle")) AND TITLE-ABS-KEY (("enteric methane" OR "methane emission*" OR "rumen methane" OR "CH4 emission*")) AND TITLE-ABS-KEY ((additive* OR "feed additive*" OR "dietary additive*" OR "methane inhibitor*" OR "rumen modifier*" OR 3-nitrooxypropanol OR "3-NOP" OR "red seaweed" OR Asparagopsis OR nitrate* OR "alternative electron acceptor*" OR lipid* OR oil* OR tannin* OR saponin* OR "essential oil*" OR biochar OR "plant secondary metabolite*")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "BIOC") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENVI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")) AND (LIMIT-TO (OA, "all"))).

La selección de estudios se desarrolló mediante etapas siguiendo el diagrama PRISMA, al inicio se identificaron 1274 registros provenientes de Scopus (488), ScienceDirect (392) y Dimensions (394). Posteriormente, se eliminaron 207 duplicados, quedando 1067 documentos para la revisión de títulos y resúmenes, de los cuales 951 fueron excluidos por no cumplir con el enfoque de investigación. Los 116 estudios restantes fueron evaluados a texto completo; 42 fueron descartados por falta de acceso y 28 por incumplir los criterios de inclusión, quedando 46 artículos para la evaluación de elegibilidad mediante criterios PICO. Luego, tras esta revisión, se excluyeron 5 estudios adicionales, obteniéndose 41 artículos que cumplieron con los criterios establecidos sobre aditivos nutricionales para la mitigación del metano entérico en bovinos.

Para organizar y clasificar sistemáticamente los hallazgos, se utilizó el gestor Zotero, mediante el cual se seleccionaron y gestionaron los 34 artículos científicos considerando información como autor, título, año de publicación, enlace, objetivo, palabras clave, variables, tipo de estudio y metodología. Posteriormente, se evaluó el riesgo de sesgo de los estudios incluidos; la Figura 3 destacó un predominio de riesgo bajo en la mayoría de los dominios, en el manejo de datos incompletos y la presentación de resultados, aunque algunos estudios presentaron riesgo medio en la ocultación de la asignación, el cegamiento del evaluador y la generación aleatoria, mientras que el riesgo alto fue poco frecuente. Asimismo, los hallazgos se sintetizaron mediante una matriz comparativa, un análisis temático de acuerdo con los objetivos de la investigación y un análisis bibliométrico realizado con el software VOSviewer, basado en las palabras clave de los artículos seleccionados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los estudios analizados entre 2021 y 2026 evidenciaron una amplia distribución geográfica, con investigaciones desarrolladas en países de América, Europa, Asia, África y Oceanía, reflejando el interés mundial por evaluar estrategias nutricionales que reduzcan el metano entérico y mejorar la sostenibilidad de la producción bovina. Según la Figura 4, Dinamarca concentró la mayor proporción de estudios (17,9 %), seguida de Suiza y Australia (10,7 % cada una), mientras que México, Canadá y Turquía representaron el 7,1 % de las publicaciones. Asimismo, la Figura 5 mostró un incremento progresivo de investigaciones sobre aditivos nutricionales, pasando de 2 estudios en 2021 a un máximo de 10 estudios en 2025, evidenciando el creciente interés científico por desarrollar alternativas sostenibles que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero sin afectar la productividad animal. La presente revisión sistemática está estructurada en función de los objetivos específicos definidos y enfocado únicamente en la evidencia técnica de los estudios evaluados.

Con relación al primer objetivo específico orientado a clasificar los aditivos nutricionales y describir sus mecanismos de acción sobre el microbioma ruminal, las fuentes revisadas permitieron evidenciar dos grandes grupos funcionales. El primer grupo corresponde a los inhibidores directos de la metanogénesis, dentro de los cuales destaca el 3-nitrooxipropanol (3-NOP), cuyo mecanismo consiste en la desactivación de la enzima metil-coenzima M reductasa, considerada esencial en la fase final de la producción de metano por las arqueas metanogénicas. De manera similar, los compuestos halogenados, como el bromoformo y el iodoformo, interfieren directamente en las rutas bioquímicas de transferencia de grupos metilo necesarias para la formación de metano. El segundo grupo comprende los modificadores del ecosistema ruminal, entre ellos los aceites vegetales, nitratos, especies forrajeras con metabolitos secundarios y aditivos fitogénicos; compuestos que actúan indirectamente mediante la reducción de poblaciones de protozoarios, el uso alternativo del hidrógeno disponible en el rumen, ó la modificación de la composición microbiana, disminuyendo la abundancia de arqueas metanogénicas como *Methanobrevibacter*.

En relación con el segundo objetivo específico, enfocado en la eficacia de los aditivos en la reducción de emisiones de CH₄, los resultados mostraron que las mayores tasas de mitigación fueron reportadas para el bromoformo sintético, con reducciones superiores al 90 % de la metanogénesis. Asimismo, la



inclusión de la macroalga roja *Asparagopsis taxiformis* mostró una disminución cercana al 68 % de las emisiones en sistemas intensivos de engorde. Por su parte, el 3-NOP destacó por presentar una reducción de las emisiones en promedio del 30 % al 33 % tanto en la producción diaria como en el rendimiento de metano. Sin embargo, la eficacia observada en sistemas de pastoreo fue menor que en sistemas estabulados, evidenciándose una brecha tecnológica asociada a las condiciones de suministro y control del aditivo. Adicionalmente, algunos subproductos agroindustriales, como el orujo de uva y las hojas de vid, mostraron resultados prometedores al reducir las emisiones entre 30 % y 43 %, constituyéndose en opciones sostenibles de economía circular.

El tercer objetivo específico, enfocado en evaluar los efectos de los aditivos sobre la eficiencia productiva, el desempeño animal y la salud, se evidencio respuestas heterogéneas. Así mismo, la suplementación con 3-NOP en determinadas dosis redujo el consumo de materia seca y ocasionó ligeras disminuciones en la producción de leche corregida por energía. Asimismo, la inclusión de aceites vegetales provocó una reducción significativa del contenido de grasa láctea debido a alteraciones en los procesos de síntesis de novo de ácidos grasos. La incorporación de hojas y taninos de avellano disminuyó las pérdidas de nitrógeno volátil al ambiente, generando una estrategia de mitigación simultánea de múltiples contaminantes. Del mismo modo, sistemas extensivos suplementados con fenogreco y leguminosas ricas en taninos registraron incrementos sustanciales en la ganancia diaria de peso. En lo sanitario, el uso de nitrato encapsulado no produjo efectos tóxicos en animales cebuinos, mientras que los lípidos tropicales contribuyeron a mejorar la densidad energética de dietas de baja calidad nutricional.

El cuarto objetivo específico, orientado a identificar los riesgos y limitaciones para la implementación de estas tecnologías, evidenció desafíos relacionados con la seguridad alimentaria, la sostenibilidad ambiental y la viabilidad tecnológica. Entre los hallazgos se encontraron el incremento del yodo en leche por el uso de iodoformo, el riesgo de aumentar las emisiones de óxido nitroso al emplear nitratos, la disminución de la eficacia de algunos aditivos por adaptación del microbioma ruminal, posibles efectos adversos de ciertos fitogénicos sobre la salud animal y las limitaciones de los sensores IoT para el monitoreo continuo de las emisiones de metano en condiciones comerciales.

Asimismo se pudo determinar dos estrategias de mitigación para el metano entérico generado por los rumiantes (Dorca-Preda et al., 2024; Waters et al., 2025)

La primera estrategia con mayor eficacia correspondió al uso de aditivos inhibidores específicos, conformados por compuestos químicos y bioactivos que lograron las mayores reducciones de metano entérico (CH₄). Entre ellos destacaron *Asparagopsis* spp., cuyo contenido de bromoformo inhibe la etapa final de la metanogénesis dependiente de la vitamina B12, y el 3-nitrooxipropanol (3-NOP o Bovaer), un aditivo químico de eficacia y seguridad comprobadas que actúa inhibiendo la enzima metil-coenzima M reductasa, esencial para la formación de metano (Alvarez-Hess et al., 2024; Garcia et al., 2022; Gyltshen et al., 2025; Johansen et al., 2025; Ma et al., 2024; Muizelaar et al., 2026; Roque et al., 2026; Sun et al., 2025; Waters et al., 2025).

La segunda estrategia con mayor sostenibilidad sistémica fue la gestión de pasturas y el uso de metabolitos secundarios, basada en modificaciones dietéticas naturales que favorecen la reducción del metano y la sostenibilidad del ecosistema ruminal. Entre las principales alternativas destacaron las leguminosas con taninos, como *Lotus* spp., que disminuyen la actividad metanogénica y mejoran el aprovechamiento del nitrógeno; las hojas de avellano (*Corylus avellana*), como fuente sostenible de taninos condensados; y los subproductos agroindustriales, como el orujo de uva y la cáscara de cacao, cuyos polifenoles contribuyen a reducir las emisiones de CH₄ y promueven una economía circular sin afectar significativamente la fermentación ruminal (Alecrim et al., 2024; Dorca-Preda et al., 2024; Goncalves Noronha et al., 2026; Srakaew et al., 2026; Terranova et al., 2021)

La revisión sistemática, basada en 34 estudios publicados entre 2021 y 2026 en Oceanía, África, América y Europa, evidenció que la mitigación del metano entérico dependió de la interacción entre el consumo de materia seca, la composición de la dieta y las propiedades de los aditivos nutricionales. Se identificó que el consumo de materia seca explicó gran parte de la variación en las emisiones de metano, mientras que las dietas con mayor contenido de almidón favorecieron procesos ruminales que redujeron la metanogénesis.

Los resultados demostraron que los aditivos nutricionales disminuyeron significativamente las emisiones de CH₄ sin comprometer la productividad animal. Entre los más eficaces destacaron el 3-nitrooxipropanol (3-NOP), con reducciones de entre 20 % y 60 %, y *Asparagopsis* spp., que alcanzó



disminuciones superiores al 60 % y cercanas al 80 %. Asimismo, otros aditivos, como aceites esenciales, taninos, hojas de avellano, residuos agroindustriales y diferentes fuentes lipídicas, contribuyeron a reducir las emisiones y, en varios casos, mejoraron la eficiencia alimenticia, la digestibilidad y la producción de leche.

Aunque algunos estudios reportaron limitaciones relacionadas con el consumo de alimento, la fermentación ruminal, el metabolismo del nitrógeno y la viabilidad económica, la evidencia científica indicó que las estrategias nutricionales evaluadas presentaron un alto potencial para promover sistemas de producción bovina más sostenibles al reducir las emisiones de metano y mantener el rendimiento productivo.

En el análisis bibliométrico realizado con VOSviewer identificó tres clústeres temáticos (Ver Figura 6) el primero, centrado en la relación entre dieta, emisiones y productividad; el segundo, orientado a los procesos de fermentación ruminal y la acción de los aditivos sobre el microbioma; y el tercero, enfocado en las intervenciones con aceites en vacas lecheras, reflejándose las tendencias y las líneas de desarrollo científico en torno a la mitigación del metano entérico mediante aditivos nutricionales.

Los hallazgos de la revisión sistemática evidenciaron que los aditivos nutricionales representaron una estrategia eficaz para mitigar el metano entérico en bovinos durante el periodo 2021–2026, destacando los inhibidores enzimáticos específicos y los metabolitos secundarios de plantas. El 3-nitrooxipropanol (3-NOP) se consolidó como la intervención con resultados más consistentes, al lograr reducciones cercanas al 30 % mediante la inhibición de la enzima metil-coenzima M reductasa (Waters et al., 2025); sin embargo, su eficacia disminuyó en dietas con mayor contenido de fibra detergente neutra (FDN) (Ma et al., 2024; Waters et al., 2025), los halometanos, como el bromoformo e iodoformo, alcanzaron reducciones superiores al 90 % en sistemas de confinamiento, aunque su efectividad descendió considerablemente en sistemas de pastoreo debido a la volatilidad de estos compuestos y a la variabilidad en su consumo, evidenciando que la forma de suministro constituye un factor determinante para su desempeño (Alvarez-Hess et al., 2024; Gyeltshen et al., 2025; Sun et al., 2025; Muizelaar et al., 2026). (Gyeltshen et al., 2025; Muizelaar et al., 2026; Alvarez-Hess et al., 2024; Sun et al., 2025).

En relación con la productividad, la evidencia mostró que algunos aditivos altamente eficaces, como el 3-NOP y las algas del género *Asparagopsis*, pudieron reducir el consumo de materia seca y la producción

de leche cuando fueron suministrados en dosis elevadas, mientras que los lípidos y aceites vegetales se asociaron con la disminución del contenido de grasa láctea (Benchaar et al., 2025; Johansen et al., 2025; Muizelaar et al., 2026; Waters et al., 2025). En contraste, las leguminosas con taninos (*Lotus* spp.) y subproductos como el fenogreco mostraron resultados favorables al incrementar la ganancia diaria de peso y disminuir la intensidad de las emisiones de metano por kilogramo de carne producida, posicionándose como alternativas sostenibles para mejorar simultáneamente el desempeño productivo y ambiental (Alecrim et al., 2024).

Por otra parte, la revisión identificó riesgos y limitaciones, como el fenómeno de pollution swap, asociado al incremento de emisiones de óxido nitroso derivadas del uso de nitratos, así como el riesgo de residuos químicos, especialmente por el aumento de yodo en la leche generado por el iodoformo, superando los límites regulatorios establecidos (Dorca-Preda et al., 2024). Asimismo, se concentró en vacas lecheras en sistemas de confinamiento, persistiendo un vacío sobre aditivos fitogénicos locales, como los derivados del cacao, té negro y bleto, además de señalar que la eficacia a largo plazo de algunos compuestos, particularmente los aceites esenciales, se verá reducida por la adaptación progresiva del microbioma ruminal (Benchaar et al., 2025; Cuervo et al., 2025; Sezmis et al., 2023; Srakaew et al., 2026).



Tabla 1.
Desglose de los elementos PICO

Componente	Descripción
P — Población	Bovinos domésticos (<i>Bos taurus</i> , <i>Bos indicus</i> y cruzas) lecheros y de carne, en sistemas intensivos y semi-intensivos a escala global.
I — Intervención	Suplementación con aditivos nutricionales: 3-NOP, <i>Asparagopsis</i> spp., nitratos, lípidos/aceites, taninos, saponinas, aceites esenciales, biochar y subproductos vegetales con metabolitos secundarios.
C — Comparador	Dieta basal sin aditivos (control negativo); comparación entre clases de aditivos (inhibidores directos vs. modificadores del rumen).
O — Desenlaces primarios	Emisión de CH ₄ : producción total (g/d), rendimiento (g/kg MS ingerida), intensidad (g/kg producto).
O — Desenlaces secundarios	Producción de leche y composición; ganancia de peso y conversión alimentaria; fermentación ruminal; efectos adversos sobre salud animal; residuos en productos; <i>trade-offs</i> ambientales (N ₂ O, NH ₃).

Fuente: Desarrollado propiamente.

Tabla 2.
Clasificación de Aditivos Nutricionales para la Mitigación de Metano Entérico

Categoría	Descripción de las subcategorías	Fuente
Inhibidores Directos de la Metanogénesis	3-Nitrooxipropanol (3-NOP): Molécula sintética que inhibe de forma específica la enzima metil-coenzima M reductasa (MCR) en las arqueas metanogénicas, bloqueando la formación final de CH ₄	(Alvarez-Hess et al., 2024; Garcia et al., 2022; Gyeltshen et al., 2025; Johansen et al., 2025;
	Análogos de halometano (Bromoformo e Iodoformo):	Ma et al., 2024;
	Compuestos que se unen irreversiblemente a la vitamina B12 reducida, impidiendo la transferencia del grupo metilo necesaria para el metabolismo de los metanógenos.	Muizelaar et al., 2026; Ramos et al., 2025; Roque et al., 2026;

		Sarker et al., 2022; Sun
	Algas Marinas (<i>Asparagopsis spp.</i>): Macroalgas rojas ricas	et al., 2025;
	en bromoformo natural que actúan como inhibidores	Thorsteinsson et al.,
	enzimáticos potentes.	2025; Waters et al.,
		2025)
	Lípidos y Aceites Vegetales: Suplementos (palma, colza,	(Alabi et al., 2024;
	lino, soja, girasol) que reducen el CH ₄ mediante la	Alecrim et al., 2024;
	biohidrogenación de ácidos grasos (sumidero de H ₂), la	Attard et al., 2025;
	reducción de materia orgánica fermentable y toxicidad	Avilés-Nieto et al.,
	sobre protozoos y arqueas.	2023; Benchaar et al.,
	Nitratos: Actúan como aceptores de electrones alternativos	2025; Birkinshaw et al.,
	(sumideros de H ₂) que compiten termodinámicamente con	2022; Børsting et al.,
	la reducción de CO ₂ en el rumen.	2026; Coşkuntuna et al.,
Modificadore	Taninos y Saponinas: Metabolitos secundarios que inhiben	2023; Cuervo et al.,
s del	directamente a las arqueas o desvían el flujo de hidrógeno	2025; Dorca-Preda et al.,
Ecosistema	hacia la producción de propionato, mejorando la eficiencia	2024; Flores-Santiago
Ruminal	energética.	et al., 2022; Isah et al.,
		2024; Martin et al.,
		2021; Merkhan &
		Chaudhry, 2026;
	Aceites Esenciales y Fitogénicos: Extractos de plantas (ajo,	Razzaghi et al., 2022;
	orégano, comino, lavanda) que modifican la población	Reddy et al., 2023;
	bacteriana ruminal y los patrones de fermentación mediante	Sezmis et al., 2023;
	compuestos bioactivos como el linalool o el dialil disulfuro.	Srakaew et al., 2026;
		Terranova et al., 2021;
		Waters et al., 2025)

Estrategias de Manejo Dietético	Carbohidratos y Subproductos: Uso de raíces (remolacha azucarera) o residuos industriales (orujo de uva, té) que alteran la digestibilidad y el perfil de ácidos grasos volátiles para disminuir el rendimiento de CH ₄	(Goncalves et al., 2026; Olijhoek et al., 2023; Sezmis et al., 2023)
	Seguridad Alimentaria y Residuos: Estudios centrados en la transferencia de bromoformo o yodo a la leche y carne tras la suplementación.	(Alvarez-Hess et al., 2024; Dorca-Preda et al., 2024; Roque et al., 2026;
Impacto y Riesgos	Análisis de Ciclo de Vida (LCA) y Trade-offs: Evaluación de efectos ambientales colaterales como el incremento de emisiones de N ₂ O o la eutrofización terrestre derivados de la producción y uso de aditivos.	Sarker et al., 2022; Sun et al., 2025; Thorsteinsson et al., 2025)

Fuente: Desarrollado propiamente.

Tabla 3.
Factores determinantes en el uso de aditivos para mitigación de CH₄

Categoría	Descripción de las subcategorías (Factores identificados)	Fuente
Factores Dietéticos y Nutricionales	Nivel de fibra (FDN): El contenido de fibra neutro detergente en la ración basal es un factor crítico; niveles elevados de fibra pueden atenuar la eficacia mitigadora de inhibidores enzimáticos como el 3-NOP.	(Flores-Santiago et al., 2022; Garcia et al., 2022; Johansen
	Relación Forraje: Concentrado: La proporción de ingredientes en la dieta influye en el perfil de ácidos grasos volátiles y en la potencia de aditivos lipídicos como el aceite de colza.	et al., 2025; Ma et al., 2024; Olijhoek et al., 2023; Razzaghi et al., 2022; Waters et al., 2025)
	Fuente de Nitrógeno: La eficacia del 3-NOP se mantiene estable independientemente de si la fuente de nitrógeno dietético es proteína verdadera o urea.	



Factores Propios del Aditivo	Relación Dosis-Respuesta: La reducción de CH ₄ es proporcional a la dosis administrada, pero niveles excesivos actúan como factor depresor del consumo de materia seca (CMS).	(Alvarez-Hess et al., 2024; Børsting et al., 2026; Johansen et al., 2025; Merkhani & Chaudhry, 2026; Muizelaar et al., 2026; Waters et al., 2025)
	Estabilidad y Forma de Entrega: La entrega homogénea del aditivo (ej. en TMR frente a pastoreo) determina la persistencia del efecto mitigador a lo largo del día.	
	Adaptación Microbiana: La capacidad de resiliencia del microbioma ruminal frente a compuestos como aceites esenciales puede anular el efecto inhibitorio tras varias semanas de suplementación.	
	Raza y Especificidad de Especie: Factores genéticos y biológicos hacen que la respuesta a aditivos lipídicos difiera entre razas (Holstein vs Brown Swiss) y especies (vacas vs cabras).	(Alvarez-Hess et al., 2024; Ma et al., 2024; Martin et al., 2021; Sun et al., 2025)
Factores del Animal y Manejo	Comportamiento y Palatabilidad: El rechazo al aditivo por baja palatabilidad (específicamente en algas) es un factor determinante que limita el éxito de la intervención.	
Factores de Riesgo y Seguridad	Seguridad Alimentaria (Residuos): La posible transferencia de bromoformo o yodo a la leche y carne condiciona la viabilidad comercial bajo marcos regulatorios internacionales.	(Alvarez-Hess et al., 2024; Dorca-Preda et al., 2024; Sun et al., 2025; Thorsteinsson et al., 2025)
	Compromisos Ambientales (Trade-offs): Factores como el incremento de emisiones de N ₂ O (en el caso de nitratos) pueden contrarrestar el beneficio de la reducción de metano.	

Fuente: Desarrollado propiamente.

Tabla 4.
Principales tendencias en la Mitigación del Metano Entérico (2021-2026)

Tendencia	Implicancias	Total
Identificada		

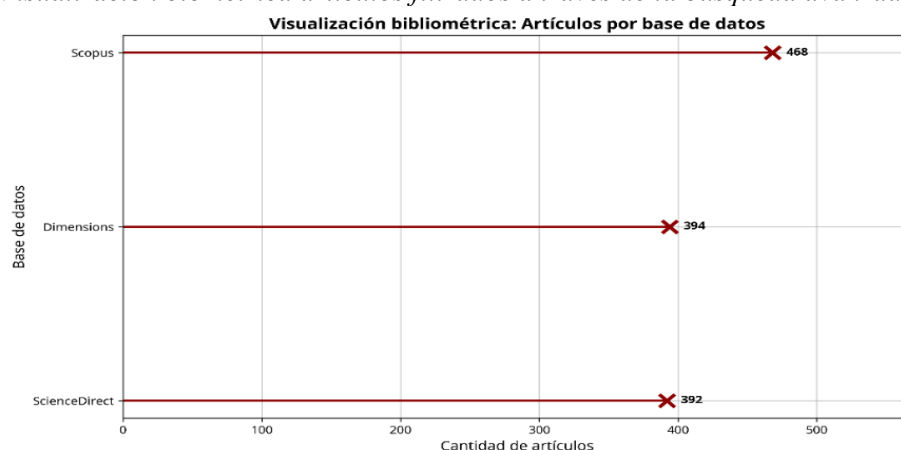


Hegemonía de los		
Inhibidores	Se consolidan como el "estándar de oro" por su alta eficacia (30-94%),	15
Específicos	aunque requieren monitoreo estricto de residuos y dosis-respuesta.	
Valorización de		
Fitogénicos y	Ofrece alternativas de bajo costo y economía circular para sistemas de	10
Subproductos	pastoreo, aunque con una potencia mitigadora más variable y moderada.	
Evaluación de Co-		
beneficios y Trade-	Revela barreras críticas de adopción: dosis altas de 3-NOP reducen el	25
offs	consumo y los aceites vegetales causan depresión de la grasa láctea.	
Monitoreo de		
Residuos e	Condiciona la viabilidad regulatoria de los halometanos; el iodoformo	8
Inocuidad	se descarta comercialmente por exceso de yodo en leche.	
Análisis de Ciclo de	Identifica que aditivos como los nitratos pueden incrementar la	
Vida (LCA) y	eutrofización y emisiones secundarias, mitigando el beneficio climático	3
"Pollution Swap"	total.	
Uso de Tecnologías		
de Medición de	Mejora la robustez de los datos en condiciones reales de campo,	12
Precisión	permitiendo mediciones continuas y menos estresantes para el animal.	

Fuente: Desarrollado propiamente.

Figura 1.

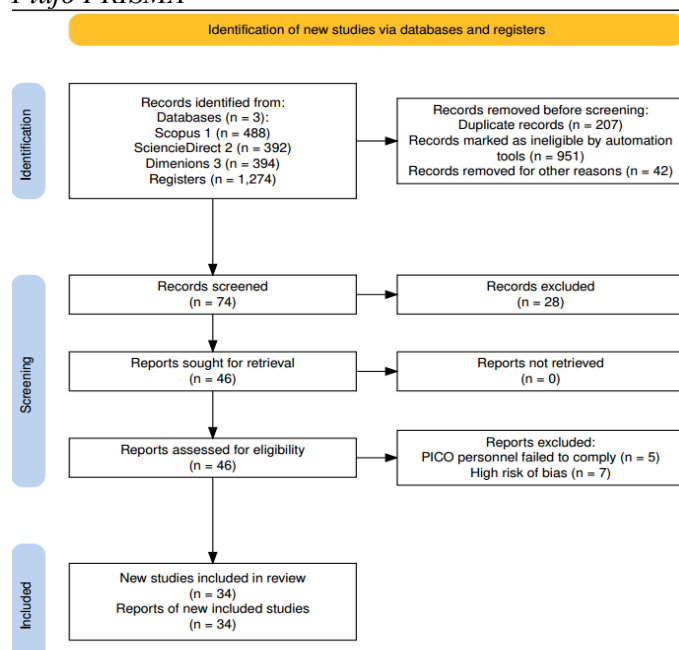
Visualización biométrica artículos filtrados a través de la búsqueda avanzada en bases de datos



Fuente: Desarrollado propiamente.

Figura 2.

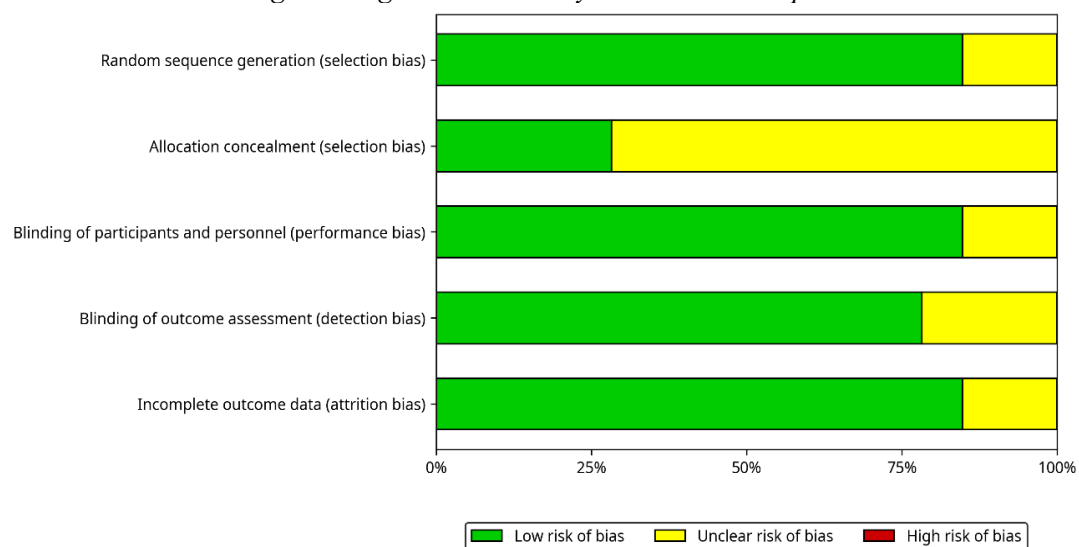
Flujo PRISMA



Fuente: Desarrollado propiamente.

Figura 3.

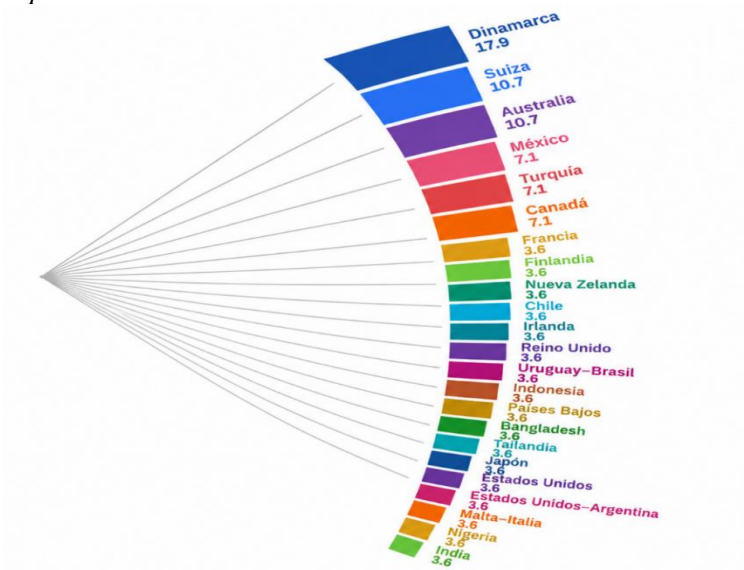
Resumen visual de riesgo de sesgo de los treinta y cuatro estudios que se han incluido



Fuente: Desarrollado propiamente.

Figura 4.

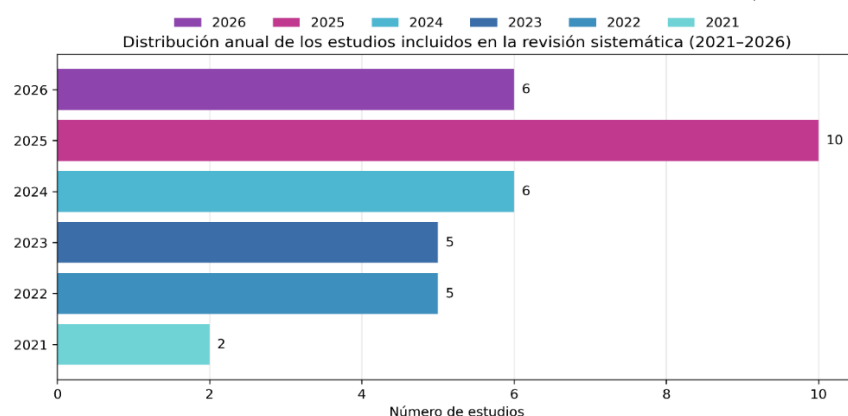
Distribución porcentual de los trabajos escogidos en función del país donde fueron publicados, durante el periodo 2021–2026.



Fuente: Desarrollado propiamente.

Figura 5.

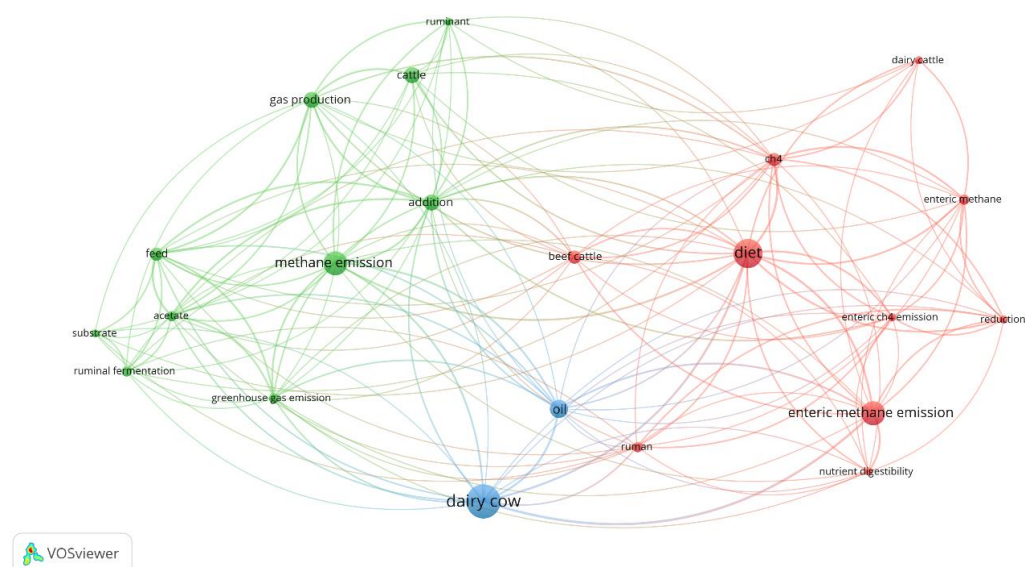
Distribución de los estudios incluidos en la revisión sistemática, durante los años 2021–2026.



Fuente: Desarrollado propiamente.

Figura 6.

Frecuencia de temas



Fuente: Desarrollado propiamente.

CONCLUSIONES

La revisión sistemática evidenció que los aditivos nutricionales fueron eficaces para reducir el metano entérico en bovinos, destacando *Asparagopsis* spp., el bromoformo estabilizado y el 3-NOP como las estrategias más efectivas, mientras que las leguminosas ricas en taninos y otros compuestos fitogénicos representaron alternativas más sostenibles al mejorar la productividad y la eficiencia del uso del

nitrógeno. No obstante, su implementación dependió del sistema productivo, los costos, la regulación y la necesidad de desarrollar más estudios de largo plazo y en condiciones reales de producción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alabi, J. O., Dele, P. A., Okedoyin, D. O., Wuaku, M., Anotaeenwere, C. C., Adelusi, O. O., Gray, D., Ike, K. A., Oderinwale, O. A., Subedi, K., & Anele, U. Y. (2024). Synergistic Effects of Essential Oil Blends and Fumaric Acid on Ruminal Fermentation, Volatile Fatty Acid Production and Greenhouse Gas Emissions Using the Rumen Simulation Technique (RUSITEC). *Fermentation*, 10(2), 114. <https://doi.org/10.3390/fermentation10020114>
- Alecrim, F. B., Devincenzi, T., Reyno, R., Mederos, A., Simón Zinno, C., Mariotta, J., Lattanzi, F. A., Nóbrega, G. N., Santander, D., Gere, J. I., Irigoyen, L., & Ciganda, V. S. (2024). Addition of Tannin-Containing Legumes to Native Grasslands: Effects on Enteric Methane Emissions, Nitrogen Losses and Animal Performance of Beef Cattle. *Sustainability*, 16(20), 9135. <https://doi.org/10.3390/su16209135>
- Alvarez-Hess, P. S., Jacobs, J. L., Kinley, R. D., Roque, B. M., Neachtain, A. S. O., Chandra, S., Russo, V. M., & Williams, S. R. O. (2024). Effects of a range of effective inclusion levels of *Asparagopsis armata* steeped in oil on enteric methane emissions of dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, 310, 115932. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2024.115932>
- Attard, E., Buttigieg, J., Simeonidis, K., & Pastorelli, G. (2025). The Modification of Dairy Cow Rations with Feed Additives Mitigates Methane Production and Reduces Nitrate Content During In Vitro Ruminal Fermentation. *Gases*, 5(3), 12. <https://doi.org/10.3390/gases5030012>
- Avilés-Nieto, J. N., Márquez-Mota, C. C., Hernández-Medrano, J. H., Ramírez-Bribiesca, J. E., Castillo-Gallegos, E., Plascencia, A., Castrejón-Pineda, F. A., & Corona, L. (2023). Effect of canola oil supplementation level on total tract digestion, ruminal fermentation, and methane emissions of cows grazing *Urochloa* sp. Supplemented with a fixed amount of concentrate. *Tropical Animal Health and Production*, 55(2), 77. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03485-8>
- Benchaar, C., Denis, P., & Chouinard, P. Y. (2025). Effects of various sources of unsaturated oil on ruminal fermentation characteristics, nutrient digestion, enteric methane emissions, nitrogen



- partitioning, and milk production in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 108(10), 10837-10854. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25698>
- Birkinshaw, A., Kreuzer, M., Sutter, M., Reidy, B., & Terranova, M. (2022). Effects of early herbage cutting and vine leaves on methane emission, urine nitrogen losses, and the milk fatty acid profile of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 105(9), 7416-7431. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21458>
- Børsting, C. F., Noel, S. J., Lashkari, S., & Hellwing, A. L. F. (2026). Performance, feed efficiency, methane emission and rumen microbiome in lactating dairy cows fed a grass-clover silage-based diet supplemented with an essential oil blend. *Animal Feed Science and Technology*, 331, 116592. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2025.116592>
- Coşkuntuna, L., Lackner, M., Erten, K., Gül, S., Palangi, V., Koç, F., & Esen, S. (2023). Greenhouse Gas Emission Reduction Potential of Lavender Meal and Essential Oil for Dairy Cows. *Fermentation*, 9(3), 253. <https://doi.org/10.3390/fermentation9030253>
- Cuervo, W., Larrauri, M., Gomez-Lopez, C., & DiLorenzo, N. (2025). Invasive Pigweed (*Amaranthus spinosus*) as a Potential Source of Plant Secondary Metabolites to Mitigate Enteric Methane Emissions in Beef Cattle. *Grasses*, 4(2), 14. <https://doi.org/10.3390/grasses4020014>
- Dorca-Preda, T., Olijhoek, D. W., Mogensen, L., Lund, P., & Kristensen, T. (2024). Climate and environmental effects of nutritional mitigation options to reduce enteric methane in dairy cattle: A life cycle assessment. *Sustainable Production and Consumption*, 47, 528-543. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.04.018>
- Elahi, U., Lazuardi, M., Plumeriastuti, H., Hestianah, E. P., Maslachah, L., Hadi, C., & Yuliani, M. G. A. (2026). Comprehensive review of benefits and risks from feeding fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) to bovines. *Agriculture and Natural Resources*, 600204. <https://doi.org/10.34044/j.anres.2026.60.2.04>
- Flores-Santiago, E. D. J., González-Garduño, R., Vaquera-Huerta, H., Calzada-Marín, J. M., Cadena-Villegas, S., Arceo-Castillo, J. I., Vázquez-Mendoza, P., & Ku-Vera, J. C. (2022). Reduction of Enteric Methane Emissions in Heifers Fed Tropical Grass-Based Rations Supplemented with Palm Oil. *Fermentation*, 8(8), 349. <https://doi.org/10.3390/fermentation8080349>



- Garcia, F., Muñoz, C., Martínez-Ferrer, J., Urrutia, N. L., Martínez, E. D., Saldivia, M., Immig, I., Kindermann, M., Walker, N., & Ungerfeld, E. M. (2022). 3-Nitrooxypropanol substantially decreased enteric methane emissions of dairy cows fed true protein- or urea-containing diets. *Heliyon*, 8(6), e09738. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09738>
- Goncalves Noronha, A. M. D. C., Ahmed, E., Matti-Alapafuja, A. O., Batbekh, B., Hanada, M., Fukuma, N., & Nishida, T. (2026). The Mitigation of Methane Emissions from Ruminants: Evaluating the Efficacy of Selected Additives and Feed Replacements in an In Vitro Trial. *Dairy*, 7(2), 25. <https://doi.org/10.3390/dairy7020025>
- Gyeltshen, T., Alvarez-Hess, P. S., Jacques, S., Auldist, M. J., & Cowley, F. C. (2025). Feeding a bromoform-based feed additive for methane mitigation in beef cattle. *Animal Feed Science and Technology*, 326, 116401. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2025.116401>
- Isah, O. A., Akinola, O. S., Adelusi, A. O., Ibrahim, T. O., Adesina, O. O., Olajide, O. V., Olatunji, M. A., Olajide, O. O., Adebayo, T. O., Haruna, M. G., Adegboye, O. R., Kuye, O. M., Emmanuel, H. O., & Emmanuel, P. O. (2024). IN VITRO ASSESSMENT OF GRAIN OF PARADISE ADDITIVE AS ANTIMICROBIAL GROWTH PROMOTER: EFFECT IN RUMINANT DIET. *Nigerian Journal of Animal Production*, 1803-1806. <https://doi.org/10.51791/njap.vi.7342>
- Johansen, M., Maigaard, M., & Lund, P. (2025). Effect of Bovaer inclusion in rations with high proportion of corn silage harvested with different stubble height on production performance and gas emission in dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, 329, 116512. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2025.116512>
- Ma, X., Räisänen, S. E., Garcia-Ascolani, M. E., Bobkov, M., He, T., Islam, M. Z., Li, Y., Peng, R., Reichenbach, M., Serviento, A. M., Soussan, E., Sun, X., Wang, K., Yang, S., Zeng, Z., & Niu, M. (2024). Effects of 3-nitrooxypropanol (Bovaer10) and whole cottonseed on milk production and enteric methane emissions from dairy cows under Swiss management conditions. *Journal of Dairy Science*, 107(9), 6817-6833. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24460>
- Martin, C., Coppa, M., Fougère, H., Bougouin, A., Baumont, R., Eugène, M., & Bernard, L. (2021). Diets supplemented with corn oil and wheat starch, marine algae, or hydrogenated palm oil

- modulate methane emissions similarly in dairy goats and cows, but not feeding behavior. *Animal Feed Science and Technology*, 272, 114783. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114783>
- Merkhan, K., & Chaudhry, A. S. (2026). Phytogenic feed additives mitigate in vitro methanogenesis and alter microbial community and functional pathways in the dairy cow rumen. *Anaerobe*, 98, 103046. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2026.103046>
- Muizelaar, W., Nichols, K., Taweel, H. Z., Van Laar, H., Dijkstra, J., & Martín-Tereso, J. (2026). Enteric methane production in response to direct ruminal infusion of synthetic bromoform in cattle. *Journal of Dairy Science*, 109(4), 3851-3862. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-27372>
- Olijhoek, D. W., Lamminen, M., Hellwing, A. L. F., Larsen, M., Weisbjerg, M. R., Bach Knudsen, K. E., & Lund, P. (2023). Effect of substituting maize silage with fresh or ensiled sugar beets on nutrient digestibility, rumen fermentation and microbial synthesis, and enteric methane emission in dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, 303, 115715. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115715>
- Ramos, T. R., Dash, S. S., Do Prado, I. N., McAllister, T. A., Stanford, K., & Terry, S. A. (2025). Evaluating the efficacy of red, brown, and green seaweeds in reducing in vitro methane production from cattle. *Canadian Journal of Animal Science*, 105, 1-12. <https://doi.org/10.1139/cjas-2025-0009>
- Razzaghi, A., Leskinen, H., Ahvenjärvi, S., Aro, H., & Bayat, A. R. (2022). Energy utilization and milk fat responses to rapeseed oil when fed to lactating dairy cows receiving different dietary forage to concentrate ratio. *Animal Feed Science and Technology*, 293, 115454. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115454>
- Reddy, R. D., Chaudhary, P., Tyagi, N., Mohini, M., & Mondal, G. (2023). Evaluation of Rumen Methane Emission in Sahiwal and Gir Calves Supplemented with Combination of Methanogenic Inhibitors. *Methane*, 2(2), 241-251. <https://doi.org/10.3390/methane2020016>
- Roque, B. M., Almeida, A. K., Fortes, M. R. S., Palmieri, C., & Kinley, R. D. (2026). Asparagopsis meal reduces enteric methane emissions of feedlot beef cattle without impact on productivity or meat and carcass quality. *Livestock Science*, 303, 105873. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2025.105873>



- Sarker, M., Anwar, M., Islam, H., Alam, M., & Reefat, H. (2022). Possible use of seaweed (*Gracilaria tenuistipitata* Var. *Liui*) to the reduction of enteric methane emissions from dairy cattle. *Veterinary Research Notes*, 2(11), 78. <https://doi.org/10.5455/vrn.2022.b18>
- Sezmis, G., Kaya, A., Kaya, H., Macit, M., Erten, K., Palangi, V., & Lackner, M. (2023). Comparison of Black Tea Waste and Legume Roughages: Methane Mitigation and Rumen Fermentation Parameters. *Metabolites*, 13(6), 731. <https://doi.org/10.3390/metabo13060731>
- Srakaew, W., Suntara, C., Jittaniramon, T., Bourapa, R., Feepakpro, A., Thongpun, S., Wongnen, C., & Nan, T. N. (2026). Inclusion of unqualified cacao pod in mineral feed block: A novel strategy to improve rumen fermentation and mitigate methane emissions in beef cattle. *Animal Bioscience*, 39(3), 250436. <https://doi.org/10.5713/ab.25.0436>
- Sun, X., Matiya, F., Alvarez-Hess, P. S., Lowe, K., Jacques, S., Auldist, M. J., & Pacheco, D. (2025). Dose-dependent inhibitory effects of an investigational feed additive containing bromoform on methane emissions from cattle fed fresh pasture. *Animal Nutrition*, 23, 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2025.06.005>
- Terranova, M., Eggerschwiler, L., Ortmann, S., Clauss, M., Kreuzer, M., & Schwarm, A. (2021). Increasing the proportion of hazel leaves in the diet of dairy cows reduced methane yield and excretion of nitrogen in volatile form, but not milk yield. *Animal Feed Science and Technology*, 276, 114790. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114790>
- Thorsteinsson, M., Noel, S. J., Lund, P., Weisbjerg, M. R., Hellwing, A. L. F., & Nielsen, M. O. (2025). Iodoform as an Anti-Methanogenic Feed Additive in Total Mixed Rations of Dairy Cows. *Dairy*, 6(2), 17. <https://doi.org/10.3390/dairy6020017>
- Waters, S. M., Roskam, E., Smith, P. E., Kenny, D. A., Popova, M., Eugène, M., & Morgavi, D. P. (2025). International Symposium on Ruminant Physiology: The role of rumen microbiome in the development of methane mitigation strategies for ruminant livestock. *Journal of Dairy Science*, 108(7), 7591-7606. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25778>

