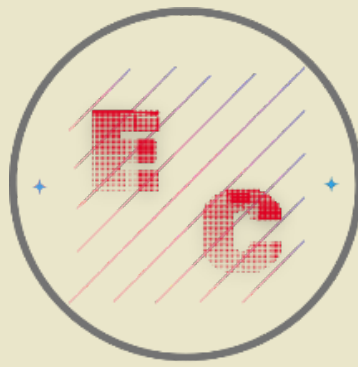




REVISTA MULTIDISCIPLINAR EPISTEMOLOGÍA DE LAS CIENCIAS

Volumen 3, Número 3
Julio-Septiembre 2026

Edición Trimestral

CROSSREF PREFIX DOI: 10.71112

ISSN: 3061-7812, www.omniscens.com

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 3, Número 3
julio-septiembre 2026

Publicación trimestral
Hecho en México

La Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias acepta publicaciones de cualquier área del conocimiento, promoviendo una plataforma inclusiva para la discusión y análisis de los fundamentos epistemológicos en diversas disciplinas. La revista invita a investigadores y profesionales de campos como las ciencias naturales, sociales, humanísticas, tecnológicas y de la salud, entre otros, a contribuir con artículos originales, revisiones, estudios de caso y ensayos teóricos. Con su enfoque multidisciplinario, busca fomentar el diálogo y la reflexión sobre las metodologías, teorías y prácticas que sustentan el avance del conocimiento científico en todas las áreas.

Contacto principal: admin@omniscens.com

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación

Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido de la publicación sin previa autorización de la Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.



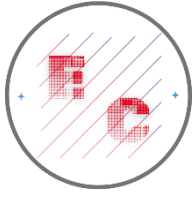
Copyright © 2026: Los autores



9773061781003

Cintillo legal

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias Vol. 3, Núm. 3, julio-septiembre 2026, es una publicación trimestral editada por el Dr. Moises Ake Uc, C. 51 #221 x 16B , Las Brisas, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97144 , Tel. 9993556027, Web: <https://www.omniscens.com>, admin@omniscens.com, Editor responsable: Dr. Moises Ake Uc. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-121717181700-102, ISSN: 3061-7812, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsable de la última actualización de este número, Dr. Moises Ake Uc, fecha de última modificación, 1 julio 2026.



Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 3, Número 3, 2026, julio-septiembre

DOI: <https://doi.org/10.71112/r6751382>

**RESIDUOS AGROINDUSTRIALES DE MANGO (MANGIFERA INDICA) Y GUANDUL
(CAJANUS CAJAN) PARA LA ALIMENTACIÓN DE RUMIANTES:
COMPLEMENTARIEDAD NUTRICIONAL Y BIOECONOMÍA CIRCULAR EN EL
DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO, COLOMBIA**

**AGRO-INDUSTRIAL MANGO (MANGIFERA INDICA) RESIDUES AND PIGEON PEA
(CAJANUS CAJAN) FOR RUMINANT FEEDING: NUTRITIONAL
COMPLEMENTARITY AND CIRCULAR BIOECONOMY IN THE DEPARTMENT OF
ATLÁNTICO, COLOMBIA**

Gerardo Ramón Gómez-Peña

Colombia.

Residuos agroindustriales de mango (mangifera indica) y guandul (cajanus cajan) para la alimentación de rumiantes: complementariedad nutricional y bioeconomía circular en el departamento del atlántico, Colombia

Agro-industrial mango (mangifera indica) residues and pigeon pea (cajanus cajan) for ruminant feeding: nutritional complementarity and circular bioeconomy in the department of atlántico, Colombia

Gerardo Ramón Gómez-Peña^{a,*}

g2gomez_29@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0231-237X>

*Autor de correspondencia: g2gomez_29@hotmail.com, ^aUniversidad del Atlántico. Facultad de Ingeniería, Barranquilla, Colombia.

RESUMEN

La presente revisión analiza el potencial de los residuos de mango (*Mangifera indica*) y del guandul (*Cajanus cajan*) para la alimentación de rumiantes bajo un enfoque de bioeconomía circular en el Atlántico, Colombia. Se realizó una revisión sistemática siguiendo PRISMA, mediante búsquedas en bases científicas del período 2000–2026, seleccionándose 50 estudios sobre composición bromatológica, degradabilidad ruminal, factores antinutricionales y metabolitos secundarios. Los resultados evidencian que el mango aporta carbohidratos fermentables, pectinas y compuestos bioactivos, mientras que el guandul proporciona proteína, aminoácidos y fibra estructural, mostrando complementariedad nutricional. Con base en esta evidencia, se propone un modelo conceptual que integra ambos recursos mediante estrategias de conservación, aprovechamiento de residuos y valorización territorial. Se concluye que esta

alternativa puede contribuir a la sostenibilidad de los sistemas ganaderos tropicales, aunque requiere validación experimental *in vitro* e *in vivo* de sus efectos nutricionales, productivos y ambientales.

Palabras claves: economía circular; metabolitos secundarios; nutrición animal; residuos agroindustriales; sostenibilidad pecuaria; valorización de biomasa.

ABSTRACT

This review analyzes the potential of mango residues (*Mangifera indica*) and pigeon pea (*Cajanus cajan*) for ruminant feeding within a circular bioeconomy approach in Atlántico, Colombia. A systematic review was conducted following PRISMA, using searches of scientific databases covering the period 2000–2026, with 50 studies selected on proximate composition, ruminal degradability, antinutritional factors, and secondary metabolites. The results show that mango provides fermentable carbohydrates, pectins, and bioactive compounds, while pigeon pea provides protein, amino acids, and structural fiber, demonstrating nutritional complementarity. Based on this evidence, a conceptual model is proposed that integrates both resources through conservation strategies, waste utilization, and territorial valorization. It is concluded that this alternative could contribute to the sustainability of tropical livestock systems, although experimental validation *in vitro* and *in vivo* is required to assess its nutritional, productive, and environmental effects.

Keywords: circular economy; secondary metabolites; animal nutrition; agro-industrial waste; sustainable livestock production; biomass valorization.

Recibido: 11 agosto 2026 | Aceptado: 30 agosto 2026 | Publicado: 31 agosto 2026

INTRODUCCIÓN

La generación de residuos agroindustriales de frutas tropicales representa un desafío ambiental y productivo para los sistemas agroalimentarios (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2022). Entre ellos, los subproductos del mango (*Mangifera indica*) son relevantes por el aumento de su producción y procesamiento (Gouda & Mourtada, 2021; Kučuk et al., 2024). Su industrialización genera cáscaras, semillas y pulpa residual que, sin un manejo adecuado, pueden acumular biomasa y generar gases durante su descomposición (FAO, 2022; Mugwagwa & Chimphango, 2021). Sin embargo, estos residuos contienen nutrientes y compuestos bioactivos que pueden reincorporarse a la producción pecuaria mediante estrategias de valorización y bioeconomía circular (FAO & IFAD, 2019; Stegmann et al., 2020). Su aprovechamiento permite recuperar nutrientes y energía, reducir pérdidas de biomasa y disminuir la dependencia de materias primas convencionales, favoreciendo la sostenibilidad de los sistemas ganaderos (Makkar, 2026; Stegmann et al., 2020; Wanapat et al., 2024).

Los residuos de mango presentan características nutricionales que permiten considerarlos ingredientes alternativos para la alimentación animal (Kučuk et al., 2024; Vastolo et al., 2022). Cáscaras, semillas y pulpa residual aportan carbohidratos fermentables, fibra, minerales y compuestos fenólicos, cuya composición varía según la variedad, madurez y procesamiento (Cañaveral-Martínez et al., 2023; de Brito Araújo et al., 2021; Jahurul et al., 2015; Kaur et al., 2025). También contienen antioxidantes, flavonoides y carotenoides con potencial funcional en dietas para rumiantes (Alañón et al., 2021; Choudhary et al., 2023; de Sousa et al., 2021; Jahurul et al., 2015). Estudios reportan resultados favorables de estos subproductos en ensilajes, bloques multinutricionales y raciones para bovinos, ovinos y caprinos, con mejoras en la digestibilidad y aprovechamiento de nutrientes (Anim-Jnr et al., 2025; Beriso & Tesfaye, 2024; Beriso & Tesfaye, 2024; Kučuk et al., 2024; Mwaurah et al.,

2021; Torres-León et al., 2016). No obstante, su uso está limitado por la humedad, la variabilidad de su composición y la presencia de factores antinutricionales, por lo que requieren procesos adecuados de conservación y tratamiento (Akhtar et al., 2025; Castro-Montoya & Dickhoefer, 2020; Kučuk et al., 2024; Kung et al., 2018; Muck et al., 2018).

Debido a su bajo contenido proteico, los residuos de mango requieren complementarse con fuentes nitrogenadas para formular dietas balanceadas para rumiantes (Anim-Jnr et al., 2025; Zareie et al., 2025). En este sentido, el guandul (*Cajanus cajan*) es una alternativa promisorio por su contenido proteico, adaptación tropical y tolerancia al estrés hídrico y las altas temperaturas (Notenbaert et al., 2021; Saxena & Saxena, 2025). Además, aporta proteínas, aminoácidos y carbohidratos estructurales, y contribuye a la fertilidad del suelo mediante la fijación biológica de nitrógeno (Ligoski et al., 2020; Saxena & Saxena, 2025). Estudios han demostrado su adecuada digestibilidad y valor nutricional en diferentes especies pecuarias (Abidinsyah et al., 2024; Abidinsyah et al., 2025; Abuye et al., 2024; Adebisi et al., 2022; Angandza et al., 2025; Feedipedia, 2021), así como su potencial para la conservación mediante ensilaje y otras técnicas de almacenamiento (D'Mello, 1995; Haji et al., 2024; Ligoski et al., 2020).

Las características complementarias de ambos recursos permiten plantear que la mezcla de residuos de mango y guandul podría contribuir al desarrollo de alimentos pecuarios sostenibles a partir de recursos locales (Saxena & Saxena, 2025; Stegmann et al., 2020). Los subproductos de mango aportan energía, carbohidratos fermentables y compuestos bioactivos (Cañaveral-Martínez et al., 2023; Jahurul et al., 2015), mientras el guandul aporta proteína y aminoácidos esenciales, favoreciendo potencialmente la sincronización entre nitrógeno y energía en el rumen (Ligoski et al., 2020; Van Soest, 1994). Además, sus metabolitos secundarios y carbohidratos estructurales pueden contribuir a la estabilidad ruminal y a la modulación de la actividad microbiana (Arndt et al., 2021; Bodas et al., 2012; Calsamiglia et al.,

2007; Golder & Lean, 2024; Janssen, 2010; Keum et al., 2024; Patra & Saxena, 2010). Sin embargo, la mayoría de los estudios han evaluado estos recursos por separado, por lo que sus posibles efectos combinados sobre la cinética ruminal, la fermentación y el valor biológico de la mezcla aún requieren validación experimental in vitro e in vivo (Van Soest, 1994).

En el Caribe colombiano, especialmente en el Atlántico, esta propuesta cobra relevancia por la disponibilidad de mango y guandul y las características de los sistemas pecuarios regionales (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR], 2023; Valderrama & Martínez, 2018). El departamento cuenta con aproximadamente 2.516 ha de mango y una producción cercana a 33.627 t anuales, equivalente al 9 % de la producción nacional (MADR, 2023). Su procesamiento genera cáscaras, semillas y pulpa residual y, considerando que entre el 35 % y el 60 % del fruto puede convertirse en residuo, se estima un potencial de aproximadamente 13.450 t anuales de biomasa aprovechable (Kučuk et al., 2024; MADR, 2023).

El aprovechamiento de estos residuos junto con forrajes locales como el guandul y estrategias de suplementación en época seca se relaciona con los principios de la bioeconomía circular (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA], 2021; Makkar, 2026; Ocampo & Cardona, 2020; Stegmann et al., 2020). La integración de mango y guandul en dietas podría reducir la dependencia de concentrados comerciales e insumos importados y ofrecer alternativas de menor costo para la ganadería tropical (FAO, 2020; Stegmann et al., 2020). Sin embargo, su aplicación regional requiere cadenas logísticas eficientes, tecnologías adecuadas de conservación y modelos de aprovechamiento territorial que garanticen su viabilidad económica y ambiental (Makkar, 2026).

A pesar del interés creciente por los residuos agroindustriales en la nutrición animal, existe una brecha de conocimiento sobre las mezclas de residuos de mango (*Mangifera indica*) y guandul (*Cajanus cajan*) en las condiciones tropicales del Caribe colombiano (Van Soest, 1994). Esta revisión analizó la evidencia disponible para evaluar el potencial de los residuos de

mango como materia prima para alimentos pecuarios complementados con guandul (Anim-Jnr et al., 2025; Ligoski et al., 2020). A partir de esta evidencia, se propone un marco conceptual sobre su complementariedad nutricional y sus posibles aportes ambientales, productivos y socioeconómicos en el marco de la bioeconomía circular y la sostenibilidad ganadera regional (MADR, 2023; Stegmann et al., 2020).

Materiales y métodos

Tipo de estudio

Se realizó una revisión sistemática de la literatura con enfoque cualitativo, analítico y descriptivo, siguiendo las recomendaciones de la declaración PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). El objetivo fue identificar, seleccionar, evaluar críticamente y sintetizar la evidencia científica disponible sobre el potencial nutricional y el aprovechamiento de los residuos agroindustriales de mango (*Mangifera indica*) y del guandul (*Cajanus cajan*) en la alimentación de rumiantes. La información recopilada permitió desarrollar un marco conceptual sobre la complementariedad nutricional de ambos recursos y su contribución a estrategias de valorización de biomasa, bioeconomía circular y producción pecuaria sostenible.

Consideraciones éticas

La investigación se desarrolló exclusivamente a partir de literatura científica y documentos técnicos previamente publicados, por lo que no involucró experimentación con seres humanos ni animales y, en consecuencia, no requirió la aprobación de un comité de ética. El estudio se realizó respetando los principios de integridad científica, transparencia en el manejo de la información y adecuada citación de las fuentes consultadas.

Contexto del estudio

Aunque la revisión tuvo alcance internacional, el análisis se contextualizó en el departamento del Atlántico, ubicado en la región Caribe de Colombia, debido a la disponibilidad simultánea de residuos agroindustriales de mango y cultivos de guandul, así como a la importancia de ambos recursos para los sistemas ganaderos tropicales. Esta región presenta un clima tropical de sabana (clasificación Köppen: Aw), con temperaturas medias anuales entre 27 y 30 °C, humedad relativa cercana al 80 % y precipitaciones anuales entre 800 y 1200 mm, distribuidas de manera bimodal. Estas condiciones climáticas determinan una marcada estacionalidad en la disponibilidad de forrajes, lo que hace necesario el desarrollo de estrategias de suplementación basadas en recursos locales.

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed, SciELO y Google Scholar, complementándose con documentos técnicos publicados por la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), AGROSAVIA y Feedipedia. La estrategia de búsqueda utilizó operadores booleanos (AND, OR) y combinaciones de palabras clave relacionadas con residuos de mango, guandul, alimentación de rumiantes, conservación de forrajes, bioeconomía circular y sostenibilidad pecuaria. Entre las principales ecuaciones de búsqueda empleadas se incluyeron: ("mango waste" OR "mango by-products" OR "mango peel") AND ("animal feed" OR "ruminant nutrition" OR "digestibility"); ("Cajanus cajan" OR "pigeon pea") AND ("forage" OR "crude protein" OR "ruminant feeding"); y ("circular bioeconomy" OR "valorization") AND ("livestock sustainability").

Criterios de elegibilidad

Se incluyeron artículos originales y revisiones publicados entre 2000 y 2026 en revistas científicas indexadas, además de documentos técnicos emitidos por organismos nacionales e internacionales reconocidos. Los estudios seleccionados abordaban la composición nutricional, las características bromatológicas, la conservación, los compuestos bioactivos o la utilización de *Mangifera indica* y *Cajanus cajan* en sistemas de alimentación animal, con énfasis en condiciones tropicales. Se excluyeron resúmenes de congresos, editoriales, publicaciones sin revisión por pares, estudios con información metodológica insuficiente o datos incompletos, así como aquellos no relacionados con la nutrición de rumiantes o la valorización de biomasa agroindustrial.

Selección de estudios, evaluación metodológica y síntesis de la evidencia

El proceso de selección de los estudios siguió las cuatro etapas establecidas por la declaración PRISMA 2020. Inicialmente se identificaron 130 registros potencialmente relevantes. Tras eliminar 20 documentos duplicados, se obtuvo un total de 110 publicaciones únicas. Posteriormente, durante la fase de cribado mediante la revisión de títulos y resúmenes, se excluyeron 50 estudios que no cumplían con los objetivos de la revisión. Los 60 artículos restantes fueron evaluados mediante lectura del texto completo, descartándose 10 publicaciones por presentar inconsistencias metodológicas, información insuficiente o no satisfacer los criterios de elegibilidad previamente establecidos. Finalmente, 50 estudios fueron incluidos en la síntesis cualitativa de la evidencia (Figura 1).

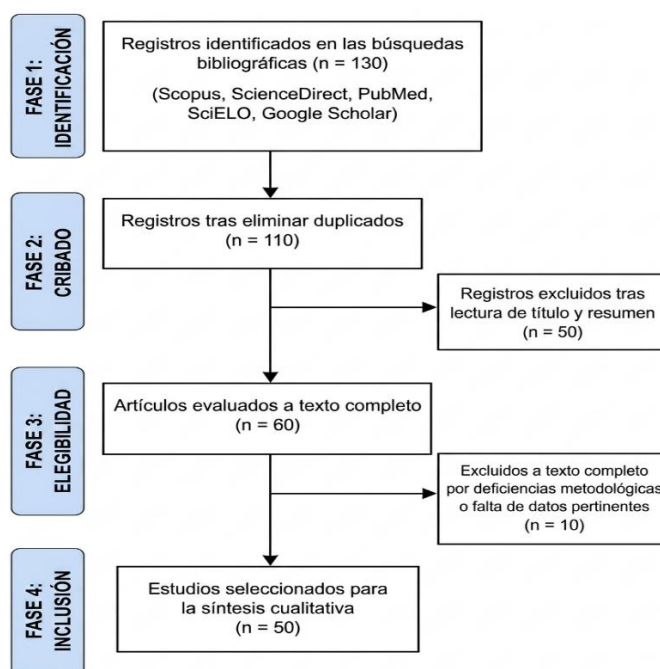
Figura 1*Diagrama de flujo PRISMA para la selección y evaluación de la literatura*

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA para la selección y evaluación de la literatura científica sobre la valorización de residuos de mango (*Mangifera indica*) y forraje de guandul (*Cajanus cajan*) en la alimentación pecuaria. Nota: Adaptado de los criterios de la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). El diagrama ilustra el proceso de identificación (n = 130), cribado tras eliminar duplicados (n = 110), evaluación de elegibilidad a texto completo (n = 60) e inclusión final de publicaciones (n = 50) utilizadas para la síntesis cualitativa de la revisión.

La calidad metodológica se evaluó según cuatro criterios: (i) claridad de los objetivos, (ii) descripción de los procedimientos analíticos, incluyendo métodos AOAC y el sistema de Van Soest cuando correspondía, (iii) consistencia del análisis e interpretación y (iv) coherencia entre resultados y conclusiones. La información se organizó en matrices temáticas para una síntesis cualitativa, estructurada en tres ejes: (i) composición bromatológica y compuestos bioactivos del mango y guandul; (ii) tecnologías de procesamiento y conservación, como ensilaje,

peletización y fermentación en estado sólido; y (iii) implicaciones nutricionales, ambientales y socioeconómicas de su valorización en sistemas ganaderos tropicales bajo un enfoque de bioeconomía circular.

RESULTADOS

Caracterización bromatológica y fraccionamiento de la fibra en residuos de mango

(*Mangifera indica*)

La evidencia científica analizada mostró que los subproductos generados durante el procesamiento industrial del mango, constituidos principalmente por cáscara, pulpa residual y semilla, representan entre el 35 % y el 60 % del peso total del fruto, lo que los convierte en una fuente importante de biomasa con potencial para su aprovechamiento en la alimentación animal (Anim-Jnr et al., 2025; Jahurul et al., 2015; Kučuk et al., 2024). En particular, las cáscaras de mango en estado fresco presentaron contenidos de materia seca (MS) entre 15 % y 25 %, mientras que la concentración de extracto libre de nitrógeno (ELN) osciló entre 51.15 % y 68.98 % de la MS, evidenciando una elevada disponibilidad de carbohidratos fermentables (Cañaveral-Martínez et al., 2023; Kučuk et al., 2024). El fraccionamiento de los carbohidratos indicó proporciones de azúcares simples y pectinas comprendidas entre 15 % y 32 %, mientras que el contenido de proteína cruda (PC) varió entre 2.65 % y 9.10 % de la MS (26.5–91.0 g/kg MS), confirmando que este subproducto constituye principalmente una fuente energética y no proteica (Kučuk et al., 2024; Zareie et al., 2025).

Respecto a la fracción fibrosa, los valores de fibra detergente neutro (FDN) oscilaron entre 20 % y 38 % de la MS, mientras que la fibra detergente ácido (FDA) se ubicó entre 12 % y 25 %, acompañadas por contenidos de fibra dietaria soluble de hasta 281 g/kg MS (Jahurul et al., 2015; Kaur et al., 2025). Asimismo, la biomasa procesada presentó valores de energía metabolizable de hasta 4260 kcal/kg MS, lo que confirma su elevado potencial energético para

su incorporación en dietas destinadas a rumiantes (Beriso & Tesfaye, 2024; Cañaveral-Martínez et al., 2023).

La semilla de mango representó entre 10 % y 25 % del peso del fruto y estuvo conformada por un endocarpio lignificado y una almendra interna rica en nutrientes. La almendra presentó contenidos de almidón de hasta 60 % de la MS y concentraciones de extracto etéreo (EE) entre 6 % y 15 % de la MS, compuesto principalmente por ácido esteárico y ácido oleico (Mwaurah et al., 2021; Torres-León et al., 2016). Además, los residuos de mango registraron concentraciones de polifenoles totales de hasta 70 g/kg MS (3553.2 mg equivalentes de ácido gálico/100 g), acompañadas por flavonoides, carotenoides, antocianinas y mangiferina, compuestos bioactivos ampliamente reconocidos por su capacidad antioxidante (Alañón et al., 2021; Choudhary et al., 2023; de Sousa et al., 2021). Finalmente, la humedad de los residuos frescos osciló entre 75 % y 85 %, característica que limita su conservación y resalta la necesidad de implementar tecnologías de procesamiento y almacenamiento para su aprovechamiento pecuario (Anim-Jnr et al., 2025; Vastolo et al., 2022).

Caracterización bromatológica y perfil nutricional del guandul (*Cajanus cajan*)

Los estudios incluidos en la revisión evidenciaron que el guandul (*Cajanus cajan*) constituye una fuente importante de proteína y nutrientes para la alimentación de rumiantes, tanto en su fracción foliar como en el grano. El follaje presentó contenidos de proteína cruda entre 15 % y 22 % de la MS, alcanzando valores máximos de 23.58 % (235.8 g/kg MS) en hojas completamente desarrolladas (Abuye et al., 2024; Saxena & Saxena, 2025). En cuanto al fraccionamiento de la fibra, los valores de FDN oscilaron entre 35 % y 50 % de la MS, mientras que la FDA se situó entre 25 % y 35 %, rangos compatibles con forrajes tropicales de buena calidad nutricional (Castro-Montoya & Dickhoefer, 2020; Ligoski et al., 2020). La digestibilidad de la materia seca del follaje alcanzó aproximadamente 59 %, confirmando su potencial como

suplemento proteico en sistemas de producción basados en pasturas tropicales (Adebisi et al., 2022; Feedipedia, 2021).

Por otra parte, el grano seco de guandul presentó concentraciones de proteína cruda entre 18 % y 25 % de la MS, con algunos materiales genéticos que alcanzaron valores cercanos al 32 %, lo que evidencia una considerable variabilidad genética y nutricional (Abuye et al., 2024; Saxena & Saxena, 2025). El perfil aminoacídico mostró cantidades relevantes de lisina, valina, treonina, fenilalanina, metionina y triptófano, acompañadas de coeficientes de digestibilidad de la materia seca de hasta 80 % (Abidinsyah et al., 2025; Haji et al., 2024). Asimismo, el grano aportó vitaminas del complejo B (tiamina, riboflavina y niacina) y minerales esenciales, entre ellos fósforo, calcio y manganeso, atributos que fortalecen su valor como ingrediente proteico en formulaciones para rumiantes (D'Mello, 1995; Feedipedia, 2021).

Caracterización bromatológica comparativa y matriz de complementariedad

La comparación de la composición bromatológica, el fraccionamiento de la fibra y el contenido de compuestos bioactivos de *Mangifera indica* y *Cajanus cajan* evidenció una marcada complementariedad nutricional entre ambos recursos (Tabla 1). Los subproductos del mango, especialmente la cáscara y la almendra, se caracterizaron por una elevada densidad energética, atribuida a sus altos contenidos de extracto libre de nitrógeno (51.15–68.98 % MS) y extracto etéreo (6.00–15.00 % MS), aunque con concentraciones relativamente bajas de proteína cruda (2.65–9.10 % MS) (Cañaveral-Martínez et al., 2023; Kuçuk et al., 2024; Mwaurah et al., 2021; Zareie et al., 2025; Torres-León et al., 2016).

Tabla 1.

Composición bromatológica y bioactiva comparativa de los subproductos de mango (*Mangifera indica*) y guandul (*Cajanus cajan*) (en base seca).

Parámetro / Componente	Cáscara de Mango	Almendra de Mango	Follaje de Guandul	Grano de Guandul
Materia Seca (MS, %)	15.00 – 25.00	45.00 – 55.00	25.00 – 35.00	88.00 – 92.00
Proteína Cruda (PC, % MS)	2.65 – 9.10	5.50 – 7.50	15.00 – 23.58	18.00 – 32.00
Extracto Etéreo (EE, % MS)	1.50 – 3.80	6.00 – 15.00	2.00 – 4.00	1.20 – 2.50
Fibra Detergente Neutro (FDN, % MS)	20.00 – 38.00	18.00 – 28.00	35.00 – 50.00	12.00 – 22.00
Fibra Detergente Ácido (FDA, % MS)	12.00 – 25.00	10.00 – 18.00	25.00 – 35.00	7.00 – 12.00
Extracto Libre de Nitrógeno (ELN, % MS)	51.15 – 68.98	50.00 – 60.00	30.00 – 42.00	50.00 – 60.00
Metabolitos Bioactivos Clave	Pectinas, Mangiferina, Polifenoles, Flavonoides	Ácido esteárico/oleico, Taninos, Almidón	Flavonoides, Taninos condensados moderados	Inhibidores de tripsina, Lectinas, Fitatos

Nota: MS = Materia Seca; PC = Proteína Cruda; EE = Extracto Etéreo; FDN = Fibra Detergente Neutro; FDA = Fibra Detergente Ácido; ELN = Extracto Libre de Nitrógeno; FANs = Factores Antinutricionales. Los valores corresponden a los rangos reportados en la literatura científica para cada componente en base seca. Entre paréntesis se indican los números de referencia bibliográfica correspondientes.

En contraste, el follaje y el grano de *Cajanus cajan* presentaron contenidos de proteína cruda entre 15.00 % y 32.00 % de la MS, junto con niveles moderados de fibra detergente neutro (35.00–50.00 % MS), características que favorecen el aporte de nitrógeno fermentable y de fibra estructural necesaria para el funcionamiento del ecosistema ruminal (Abuye et al., 2024; Castro-Montoya & Dickhoefer, 2020; Ligoski et al., 2020; Saxena, 2008). En conjunto,

estos resultados sustentan la existencia de una complementariedad nutricional entre ambos recursos, en la que los residuos de mango aportan principalmente energía y compuestos bioactivos, mientras que el guandul constituye la principal fuente de proteína y fibra estructural.

Oferta de biomasa territorial y volumen residual en el departamento del Atlántico

El proceso de búsqueda, selección y depuración de la literatura científica se resume en la Figura 1, siguiendo las etapas propuestas por la declaración PRISMA 2020, desde la identificación inicial de los registros hasta la inclusión final de 50 estudios en la síntesis cualitativa. En el contexto regional, la información reportada por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural indicó que el departamento del Atlántico cuenta con aproximadamente 2516 ha cultivadas de mango y una producción anual cercana a 33 627 t (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023). Considerando que entre el 35 % y el 60 % del peso del fruto corresponde a cáscaras, semillas y pulpa residual, se estimó una generación potencial de aproximadamente 13 450 t/año de residuos agroindustriales susceptibles de valorización para la alimentación animal (Kučuk et al., 2024; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023). Estos resultados evidencian la disponibilidad de una importante fuente de biomasa local que podría contribuir al desarrollo de estrategias de bioeconomía circular y suplementación alimenticia para los sistemas ganaderos del Caribe colombiano (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA], 2021; FAO, 2020; Stegmann et al., 2020).

DISCUSIÓN

Interpretación bromatológica y complementariedad nutricional de la mezcla mango–guandul

Los resultados de la presente revisión evidencian que los residuos agroindustriales de *Mangifera indica* presentan un perfil nutricional predominantemente energético, caracterizado por altas concentraciones de carbohidratos fermentables y una baja proporción de proteína cruda, condición que limita su utilización como único ingrediente en dietas para rumiantes (Cañaveral-Martínez et al., 2023; Kučuk et al., 2024; Zareie et al., 2025). En consecuencia, la evidencia disponible sugiere que estos subproductos requieren complementarse con fuentes nitrogenadas capaces de suministrar el nitrógeno necesario para favorecer el crecimiento del microbiota ruminal y optimizar la utilización de los carbohidratos disponibles (Van Soest, 1994).

A diferencia de numerosos residuos lignocelulósicos procedentes de cultivos tropicales, la cáscara de mango presenta cantidades apreciables de pectinas y otros carbohidratos estructurales altamente fermentables (de Sousa et al., 2021; Jahurul et al., 2015; Kaur et al., 2025). Diversos estudios han señalado que la fermentación ruminal de las pectinas favorece la producción de ácidos grasos volátiles sin provocar descensos pronunciados del pH ruminal, como ocurre con dietas ricas en almidón rápidamente fermentable, contribuyendo potencialmente a disminuir el riesgo de acidosis subaguda (Golder & Lean, 2024; Van Soest, 1994).

Por otra parte, la almendra de mango constituye una fuente adicional de energía debido a su contenido de almidón y lípidos, principalmente ácido oleico y ácido esteárico (Mwaurah et al., 2021; Torres-León et al., 2016). Sin embargo, la elevada lignificación del endocarpio limita el acceso a estos nutrientes, por lo que procesos como la molienda, trituración o peletización podrían incrementar su aprovechamiento digestivo al reducir el tamaño de partícula y mejorar la disponibilidad del contenido celular (Beriso & Tesfaye, 2024; Vastolo et al., 2022).

En contraste, tanto el follaje como el grano de *Cajanus cajan* representan fuentes importantes de proteína y aminoácidos esenciales, complementando las limitaciones nutricionales observadas en los residuos de mango (Abuye et al., 2024; Castro-Montoya & Dickhoefer, 2020; Saxena, 2008). Desde un punto de vista teórico, la combinación de ambos recursos podría favorecer una sincronización entre la disponibilidad de energía rápidamente fermentable y el suministro de nitrógeno para el microbiota ruminal, condición que diversos autores han relacionado con una mayor eficiencia en la síntesis de proteína microbiana y una utilización más eficiente del nitrógeno dietario (Van Soest, 1994). No obstante, esta hipótesis aún requiere ser confirmada mediante evaluaciones experimentales que analicen directamente la cinética de fermentación de mezclas mango–guandul.

Factores antinutricionales del guandul y alternativas de procesamiento

Aunque *Cajanus cajan* constituye una leguminosa con elevado valor nutricional, diferentes investigaciones han documentado la presencia de factores antinutricionales, entre ellos inhibidores de proteasas, lectinas, fitatos y taninos condensados, cuya concentración varía según el genotipo, el estado de madurez y las condiciones de procesamiento (D'Mello, 1995; Haji et al., 2024). Estos compuestos pueden reducir la digestibilidad de las proteínas y afectar el consumo voluntario cuando se suministran en altas concentraciones, especialmente en especies monogástricas (D'Mello, 1995).

En rumiantes, sin embargo, la microbiota ruminal posee una capacidad considerable para degradar parcialmente algunos de estos metabolitos secundarios, disminuyendo su impacto negativo sobre la digestibilidad (Keum et al., 2024; Van Soest, 1994). Aun así, la evidencia disponible recomienda implementar estrategias de procesamiento que mejoren el aprovechamiento nutricional del guandul antes de su incorporación en las raciones.

Entre las alternativas descritas en la literatura destacan el secado solar, el tostado y el ensilaje. El secado reduce el contenido de humedad y favorece la inactivación parcial de

compuestos termolábiles, mientras que el tostado disminuye significativamente la actividad de inhibidores de tripsina y lectinas, incrementando la disponibilidad de aminoácidos (Haji et al., 2024). Por su parte, el ensilaje promueve procesos de fermentación láctica capaces de mejorar la estabilidad microbiológica del material y reducir parcialmente algunos factores antinutricionales, conservando simultáneamente el valor nutricional del forraje (Akhtar et al., 2025; Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA], 2021; Ligoski et al., 2020; Muck et al., 2018).

Asimismo, diversos autores han señalado que concentraciones moderadas de taninos condensados pueden ejercer efectos beneficiosos en rumiantes al disminuir parcialmente la degradación ruminal de las proteínas y aumentar el flujo de proteína metabolizable hacia el intestino delgado, siempre que sus concentraciones permanezcan dentro de rangos fisiológicamente aceptables (D'Mello, 1995; de Sousa et al., 2021).

Conservación de la biomasa y posibles implicaciones sobre la fermentación ruminal

La elevada humedad de los residuos frescos de mango constituye una de las principales limitaciones para su utilización directa, debido a que favorece pérdidas de nutrientes y deterioro microbiológico durante el almacenamiento (Kučuk et al., 2024; Zareie et al., 2025). En este contexto, la incorporación de biomasa de guandul previamente deshidratada podría contribuir a incrementar el contenido de materia seca de la mezcla, facilitando la elaboración de ensilajes con condiciones más favorables para la fermentación láctica (Castro-Montoya & Dickhoefer, 2020; Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA], 2021; Ligoski et al., 2020).

Adicionalmente, los compuestos fenólicos presentes en los residuos de mango, particularmente la mangiferina, junto con los flavonoides y taninos del guandul, podrían ejercer efectos moduladores sobre determinadas poblaciones microbianas del rumen (Alañón et al., 2021; Choudhary et al., 2023). Diversos estudios experimentales han sugerido que estos

metabolitos secundarios pueden reducir parcialmente la actividad de protozoarios y arqueas metanogénicas, favoreciendo cambios en el patrón de fermentación ruminal y una posible disminución de las emisiones entéricas de metano (Arndt et al., 2021; Bodas et al., 2012; Calsamiglia et al., 2007; Patra & Saxena, 2010). Sin embargo, la magnitud de estos efectos depende de la dosis suministrada, del tipo de metabolito y de la composición general de la dieta, por lo que aún no existen evidencias directas para la mezcla específica de mango y guandul.

Implicaciones para la bioeconomía circular y el desarrollo territorial

Desde la perspectiva de la bioeconomía circular, la valorización de los residuos agroindustriales del mango representa una alternativa para transformar biomasa subutilizada en recursos con valor agregado para la producción pecuaria (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2020; Stegmann et al., 2020). En el departamento del Atlántico, donde se producen aproximadamente 33627 t de mango al año y se estima una generación potencial cercana a 13450 t de residuos agroindustriales, el aprovechamiento de estos materiales podría reducir la acumulación de desechos orgánicos y disminuir las emisiones derivadas de su descomposición (Kučuk et al., 2024; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR], 2023).

La incorporación del guandul complementa esta estrategia debido a su adaptación a condiciones de estrés hídrico, su capacidad de fijación biológica de nitrógeno y su elevado potencial como recurso forrajero en sistemas ganaderos tropicales (Feedipedia, 2021; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR], 2023; Saxena, 2008). En conjunto, la integración de ambos recursos constituye una alternativa prometedora para fortalecer esquemas territoriales de aprovechamiento de biomasa, reducir la dependencia de materias primas convencionales y favorecer sistemas ganaderos más sostenibles, aunque su implementación requerirá estudios técnicos y económicos que validen su factibilidad a escala

comercial (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2020; Stegmann et al., 2020). Ver figura 2.

Figura 2

Modelo conceptual para la valorización de residuos agroindustriales de mango

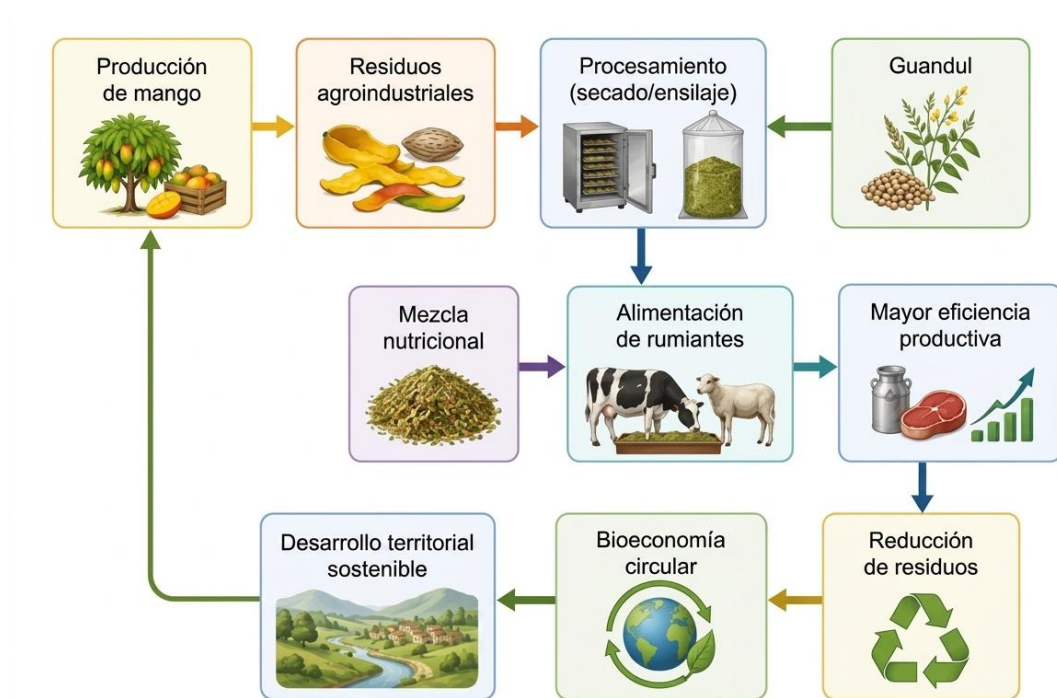


Figura 2. Modelo conceptual para la valorización de residuos agroindustriales de mango (*Mangifera indica*) y guandul (*Cajanus cajan*) en la alimentación de rumiantes bajo un enfoque de bioeconomía circular. Nota. El esquema ilustra la integración conceptual de los residuos agroindustriales de mango y la biomasa de guandul mediante procesos de conservación (secado y ensilaje) para la obtención de una mezcla nutricional destinada a la alimentación de rumiantes. Este modelo propone una estrategia de valorización de biomasa orientada a mejorar la eficiencia productiva, reducir la generación de residuos y promover el desarrollo territorial

sostenible dentro de un enfoque de bioeconomía circular. Elaboración propia a partir de la evidencia científica analizada en esta revisión.

Limitaciones del estudio

La principal limitación de esta revisión radica en que las inferencias sobre la complementariedad nutricional entre *Mangifera indica* y *Cajanus cajan* se fundamentan en estudios que evaluaron ambos recursos de manera independiente. Hasta el momento no se identificaron investigaciones que analizaran experimentalmente la mezcla de estos ingredientes bajo condiciones *in vitro* o *in vivo* en sistemas de producción del Caribe colombiano. En consecuencia, aspectos como la cinética de degradación ruminal, la producción de gases, la digestibilidad de la mezcla, la respuesta productiva y el impacto ambiental deberán ser evaluados en investigaciones futuras que permitan validar las hipótesis planteadas en este trabajo (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023; Feedipedia, 2021).

CONCLUSIONES

La evidencia científica analizada permite concluir que los residuos agroindustriales de mango (*Mangifera indica*) y el guandul (*Cajanus cajan*) poseen características nutricionales complementarias que respaldan su potencial utilización como materias primas para la alimentación de rumiantes en sistemas de producción tropical. Mientras los subproductos del mango constituyen una fuente importante de carbohidratos fermentables, pectinas y compuestos bioactivos con elevado valor energético, el guandul aporta proteína, aminoácidos esenciales y fibra estructural, conformando una combinación con potencial para el desarrollo de alimentos pecuarios basados en recursos locales.

Desde la perspectiva de la bioeconomía circular, la integración de ambos recursos representa una alternativa promisorio para la valorización de residuos agroindustriales, la reducción del desperdicio de biomasa y el aprovechamiento eficiente de recursos disponibles

en el territorio. En el departamento del Atlántico, donde coinciden una importante producción de mango y condiciones favorables para el cultivo de guandul, esta estrategia podría contribuir a fortalecer sistemas ganaderos más sostenibles, resilientes y con menor dependencia de insumos convencionales.

No obstante, es importante señalar que los posibles beneficios asociados con la sincronización entre el suministro de energía y nitrógeno, la mejora de la fermentación ruminal, la reducción de emisiones de metano y el incremento del desempeño productivo constituyen, hasta el momento, un modelo conceptual sustentado en la evidencia disponible para cada ingrediente evaluado de manera independiente. En consecuencia, estas hipótesis requieren ser verificadas mediante investigaciones experimentales que permitan validar su comportamiento cuando ambos recursos se utilizan de forma conjunta.

La presente revisión proporciona una base científica sólida para orientar futuras investigaciones sobre la utilización integrada de residuos de mango y guandul en la alimentación animal, identificando oportunidades para transformar subproductos agroindustriales en insumos de valor agregado dentro de sistemas pecuarios más eficientes y ambientalmente responsables.

Finalmente, la consolidación de esta estrategia requerirá la articulación entre productores agrícolas, ganaderos, instituciones de investigación, entidades gubernamentales y organizaciones del sector agropecuario, con el propósito de desarrollar sistemas territoriales de valorización de biomasa que favorezcan la transferencia tecnológica, el aprovechamiento sostenible de los recursos locales y la transición hacia modelos de producción pecuaria más circulares, competitivos y resilientes frente a los desafíos ambientales y económicos del Caribe colombiano.

Recomendaciones

Con el fin de validar el modelo conceptual propuesto y facilitar su aplicación en sistemas ganaderos tropicales, se recomienda desarrollar las siguientes líneas de investigación:

1. Determinar las proporciones óptimas de mango y guandul mediante estudios in vitro e in vivo, evaluando digestibilidad, fermentación ruminal y aprovechamiento de nutrientes.
2. Validar las mezclas en bovinos, evaluando consumo, digestibilidad, ganancia de peso, producción de leche y eficiencia alimenticia.
3. Evaluar su viabilidad técnica, económica y ambiental, considerando costos, conservación, aprovechamiento de residuos y potencial de aplicación en sistemas ganaderos sostenibles del Caribe colombiano.

Conflicto de intereses

El manuscrito fue preparado y revisado con la participación del autor, quien declara que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

Financiación

Este estudio fue autofinanciado por el autor y respaldado institucionalmente por la Universidad del Atlántico (Barranquilla, Colombia).

Contribución de los autores

Gerardo Ramón Gómez-Peña: Autor único. Participó en todas las etapas del estudio, incluyendo conceptualización, metodología, análisis, investigación, redacción, revisión y edición del manuscrito. Elaboró y validó las figuras con apoyo auxiliar de herramientas de inteligencia artificial. Asume la responsabilidad por el contenido, la integridad y la versión final del manuscrito.

Declaración de conflicto de interés

El autor declara que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados en el estudio.

Declaración de contribución a la autoría

Gerardo Ramón Gómez-Peña, como autor único, participó en todas las etapas de la investigación, incluyendo la conceptualización, metodología, análisis, redacción, revisión y edición del manuscrito, así como en la elaboración y validación de las figuras, asumiendo la responsabilidad total de su contenido e integridad.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial

Durante la preparación del manuscrito se utilizaron herramientas de inteligencia artificial para apoyar la corrección de estilo, revisión del resumen y elaboración de algunas figuras. La IA se empleó únicamente como herramienta de asistencia. El autor revisó y validó todo el contenido y asume plena responsabilidad por la versión final del manuscrito.

REFERENCIAS

- Abidinsyah, D. A., Suyub, I. B., Jusoh, S., & Yaakub, H. (2024). The digestibility, ruminal fermentation and methane product of *Cajanus cajan* forage as a concentrate substitute in goats. *Journal of the Indonesian Tropical Animal Agriculture*, 49(4), 307–315.
<https://doi.org/10.14710/jitaa.49.4.307-315>
- Abidinsyah, D. A., Yaakub, H., Suyub, I. B., & Jusoh, S. (2025). Nutrient and anti-nutrient compositions in different plant fractions of *Cajanus cajan* forage from Malaysia and Indonesia. *Journal of Global Innovations in Agricultural Sciences*, 13(3), 1030–1037.
<https://doi.org/10.22194/JGIAS/25.1406>
- Abuye, T., Temesgen, W., Gemechu, T., Gadisa, B., & Diribsa, M. (2024). *Cajanus cajan* and *Lablab purpureus* leaf meal-potential supplements over conventional protein sources for

- yearling Horro sheep fed a basal diet of fodder oat (*Avena sativa*) hay. *Veterinary and Animal Science*, 25, Artículo 100376. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2024.100376>
- Adebisi, A. A., Okunlola, O. O., Aluko, F. A., & Olorunnisola, A. O. (2022). Nutritional potential of *Cajanus cajan* foliage hay on growth performance and nutrient digestibility of West African dwarf growing rams fed *Panicum maximum*. *Journal of Animal Feed Research*, 12(6), 322–329. <https://doi.org/10.51227/ojafr.2022.43>
- Akhtar, M. F., Wenqiong, C., Umar, M., & Changfa, W. (2025). Biochemical properties of lactic acid bacteria for efficient silage production: An update. *Frontiers in Microbiology*, 16, Artículo 1581430. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1581430>
- Alañón, M. E., Pimentel-Moral, S., Arráez-Román, D., & Segura-Carretero, A. (2021). HPLC-DAD-Q-ToF-MS profiling of phenolic compounds from mango (*Mangifera indica* L.) seed kernel of different cultivars and maturation stages as a preliminary approach to determine functional and nutraceutical value. *Food Chemistry*, 337, Artículo 127764. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127764>
- Angandza, G. S., Mopoundza, P., & Akouango, P. (2025). Use of seed meal from the ICP7035 variety of *Cajanus cajan* in broiler rearing in the Republic of Congo. *Scholars Academic Journal of Biosciences*, 13(1), 31–38. <https://doi.org/10.36347/sajb.2025.v13i01.005>
- Anim-Jnr, A. S., Ishaq, S. B. Y., Sasu, P., Gyimah, S., Greathead, H. M. R., Boesch, C., & Abudulai, A. (2025). Valorising mango, cashew apple, and papaya by-products for sustainable small ruminant production in low-income food deficit countries: A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, Artículo 1529837. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1529837>
- Arndt, C., Hristov, A. N., Price, W. J., McClelland, S. C., Pelaez, A. M., Cueva, S. F., Oh, J., & Dijkstra, J. (2021). Strategies to mitigate enteric methane emissions by ruminants: A

- review of current options and future prospects. AgriRxiv.
<https://doi.org/10.31220/agriRxiv.2021.00040>
- Beriso, Y., & Tesfaye, E. (2024). Livestock feed potential of mango (*Mangifera indica* Linn) seed kernel. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1), Artículo 2301833.
<https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2301833>
- Beriso, Y., & Tesfaye, E. (2024). Livestock feed potential of mango (*Mangifera indica* Linn) seed kernel. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1), 2301833.
<https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2301833>
- Bodas, R., Prieto, N., García-González, R., Wallace, R. J., & López, S. (2012). Manipulation of rumen fermentation using plant secondary metabolites to reduce methane emissions. *Animal Feed Science and Technology*, 176(1–4), 78–93.
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.07.010>
- Calsamiglia, S., Busquet, M., Cardozo, P. W., Ferret, A., & Bach, A. (2007). Essential oils as modifiers of rumen microbial fermentation. *Journal of Dairy Science*, 90(6), 2580–2595.
<https://doi.org/10.3168/jds.2006-644>
- Cañaveral-Martínez, U. R., Sánchez-Santillán, P., Torres-Salado, N., Hernández-Sánchez, D., Herrera-Pérez, J., & Ayala-Monter, M. A. (2023). Effect of waste mango silage on the in vitro gas production, in situ digestibility, intake, apparent digestibility, and ruminal characteristics in calf diets. *Veterinary World*, 16(3), 421–430.
<https://doi.org/10.14202/vetworld.2023.421-430>
- Castro-Montoya, J. M., & Dickhoefer, U. (2020). The nutritional value of tropical legume forages fed to ruminants as affected by their growth habit and fed form: A systematic review. *Animal Feed Science and Technology*, 269, Artículo 114641.
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114641>

- Choudhary, P., Devi, T. B., Tushir, S., Kasana, R. C., Popatrao, D. S., & Narsaiah, K. (2023). Mango seed kernel: A bountiful source of nutritional and bioactive compounds. *Food and Bioprocess Technology*, 16, 289–312. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02889-y>
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. (2021). Estrategias de suplementación estratégica para el periodo seco en la Región Caribe. AGROSAVIA.
- de Brito Araújo, A. J., da Silva, W. P., dos Santos Moreira, I., & Santos, N. C. (2021). Effect of drying temperature on the physicochemical characteristics, bioactive compounds, and antioxidant activity of "Palmer" mango peels. *Journal of Food Process Engineering*, 44(11), Artículo e13860. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13860>
- de Sousa, A. S. B., da Silva, M. C. A., Lima, R. P., de Albuquerque Meireles, B. R. L., Cordeiro, A. T. M., da Silva Santos, E. F., & Rodrigues, A. P. M. (2021). Phenolic compounds and antioxidant activity as discriminating markers and adding value of mango varieties. *Scientia Horticulturae*, 287, Artículo 110259. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110259>
- D'Mello, J. P. F. (1995). Anti-nutritional factors in legume seeds and forages. En J. P. F. D'Mello & C. Devendra (Eds.), *Tropical legumes in animal nutrition* (pp. 135–172). CAB International.
- Feedipedia. (2021). Pigeon pea (*Cajanus cajan*) forage and seeds. Animal Feed Resources Information System - FAO, INRAE, CIRAD, AgroParisTech.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, & International Fund for Agricultural Development. (2019). Gaps and opportunities in the utilization of agro-industrial by-products for livestock feeding in Latin America and the Caribbean. FAO.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). Circular bioeconomy in agriculture: Principles and applications for sustainable livestock systems. FAO.

- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). The state of food and agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. FAO.
- Golder, H. M., & Lean, I. J. (2024). Invited review: Ruminant acidosis and its definition—A critical review. *Journal of Dairy Science*, 107(12), 10066–10098.
<https://doi.org/10.3168/jds.2024-24817>
- Gouda, G. A., & Mourtada, M. (2021). Valorization of tropical fruit by-products in animal diets: A comprehensive review. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 105(3), 512–525. <https://doi.org/10.1111/jpn.13482>
- Haji, A., Teka, T. A., Bereka, T. Y., Astatkie, T., Woldemichael, H. W., & Urugo, M. M. (2024). Effect of processing methods on the nutrient, antinutrient, functional, and antioxidant properties of pigeon pea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) flour. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, Artículo 101493. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101493>
- Jahurul, M. H. A., Zaidul, I. S. M., Ghafoor, K., Al-Juhaimi, F. Y., Nyam, K. L., Norulaini, N. A. N., Sahena, F., & Omar, A. K. M. (2015). Mango (*Mangifera indica* L.) by-products and their valuable components: A review. *Food Chemistry*, 183, 173–180.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.046>
- Janssen, P. H. (2010). Influence of dietary composition on methane production by ruminants: A review. *Journal of Animal Science*, 88(8), 2110–2121. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-2362>
- Kaur, B., Panesar, P. S., & Thakur, A. (2025). Assessment of underutilized *Mangifera indica* peels for nutritional, phytochemical and techno-functional attributes as well as its microstructural and thermal characterization. *Journal of Food Science and Technology*, 62, 1545–1558. <https://doi.org/10.1007/s13197-024-06092-z>

- Keum, G. B., Pandey, S., Kim, E. S., Doo, H., Kwak, J., Ryu, S., & Kim, H. (2024). Understanding the diversity and roles of the ruminal microbiome. *Journal of Microbiology*, 62(3), 217–230. <https://doi.org/10.1007/s12275-024-00121-4>
- Kučuk, N., Primožič, M., Kotnik, P., & Knez, Ž. (2024). Mango peels as an industrial by-product: A sustainable source of compounds with antioxidant, enzymatic, and antimicrobial activity. *Foods*, 13(4), Artículo 553. <https://doi.org/10.3390/foods13040553>
- Kung, L., Jr., Shaver, R. D., Grant, R. J., & Schmidt, R. J. (2018). Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 4020–4033. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13909>
- Ligoski, B., Gonçalves, L. F., Claudio, F. L., Alves, E. M., Krüger, A. M., Bizzuti, B. E., Pedreira, M. S., & Santos, M. V. (2020). Silage of intercropping corn, palisade grass, and pigeon pea increases protein content and reduces in vitro methane production. *Agronomy*, 10(11), Artículo 1784. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111784>
- Makkar, H. P. S. (2026). Optimization of rumen function for decreasing enteric methane: A conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*, 538, 147391. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.147391>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023). Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA) - Red de Información Agropecuaria (AGRONET). MADR.
- Muck, R. E., Nadeau, E. M. G., McAllister, T. A., Contreras-Govea, F. E., Santos, M. C., & Kung, L. (2018). Silage review: Recent advances and future uses of silage additives. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 3980–4000. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13839>
- Mugwagwa, L. R., & Chimphango, A. F. A. (2021). Comparison of physicochemical properties and economic gain from three-stage and two-stage sequential valorization of mango peels. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15(6), 1705–1718. <https://doi.org/10.1002/bbb.2166>

- Mwaurah, P. W., Kumar, S., Kumar, N., Attkan, A. K., Panghal, A., & Singh, V. K. (2021). Ultrasound and microwave-assisted solvent extraction of mango kernel oil and evaluation of physicochemical properties and fatty acid profile. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(12), Artículo e16090. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16090>
- Notenbaert, A. M. O., Douchamps, S., Villegas, D. M., Arango, J., Paul, B. K., Burkart, S., Rao, I. M., & Peters, M. (2021). Tapping into the environmental co-benefits of improved tropical forages for an agroecological transformation of livestock production systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, Artículo 742842. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.742842>
- Ocampo, A., & Cardona, C. A. (2020). Bioeconomy and circular economy in the Colombian livestock sector: Challenges and perspectives. *Revista de Economía Agraria*, 42, 115–130.
- Patra, A. K., & Saxena, J. (2010). A new perspective on the use of plant secondary metabolites to inhibit methanogenesis in the rumen. *Phytochemistry*, 71(11–12), 1198–1222. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2010.05.002>
- Saxena, K. B., & Saxena, R. K. (2025). Pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.] breeding. En G. P. Dixit, H. K. Dikshit, G. P. Mishra, & M. S. Aski (Eds.), *Fundamentals of legume breeding: A text for students and practitioners* (pp. 51–75). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-7838-9_4
- Stegmann, P., Londo, M., & Junginger, M. (2020). The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy strategies. *Journal of Cleaner Production*, 257, Artículo 120518. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120518>
- Torres-León, C., Rojas, R., Contreras-Esquivel, J. C., Serna-Cock, L., Belmares-Cerda, R. E., & Aguilar, C. N. (2016). Mango seed: A review of its chemical composition and bioactive

- compounds. *Food Chemistry*, 197, 492–506.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.124>
- Valderrama, G., & Martínez, J. (2018). Sistemas de producción bovina en el departamento del Atlántico: Caracterización técnica y económica. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 31(2), 105–117.
- Van Soest, P. J. (1994). *Nutritional ecology of the ruminant* (2.^a ed.). Cornell University Press.
- Vastolo, A., Calabrò, S., & Cutrignelli, M. I. (2022). A review on the use of agro-industrial co-products in animals' diets. *Italian Journal of Animal Science*, 21(1), 577–594.
<https://doi.org/10.1080/1828051X.2022.2039562>
- Wanapat, M., Suriyapha, C., Dagaew, G., Prachumchai, R., Phupaboon, S., Sommai, S., & Kang, S. (2024). The recycling of tropical fruit peel waste-products applied in feed additive for ruminants: Food manufacturing industries, phytonutrient properties, mechanisms, and future applications. *Journal of Agriculture and Food Research*, 17, Artículo 101234. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101234>
- Zareie, Z., Moayedi, A., & Nooshkam, M. (2025). Food waste upcycling and applications: Circular economy in modern food industries. En *Reducing food loss and waste: Challenges, trends and solutions* (pp. 295–320). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-91693-9_12