



Tendencias y avances en la investigación de forrajes para sistemas ganaderos sostenibles: Análisis bibliométrico y revisión de la literatura

Trends and advances in forage research for sustainable livestock systems: Bibliometric analysis and literature review

Lizbeth Gissele Zevallos-Ochoa^{1*}; Rodrigo Ernesto Salazar-López²; César Eduardo Honorio-Javes¹; Marco Antonio Rojas-Paredes⁴

1 Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n, Trujillo, Perú.

2 Escuela de Ing. Agronómica. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, km 1 1/2 Panamericana Sur Riobamba, Ecuador.

3 Universidad Nacional Agraria de la Selva, Huánuco, Perú.

* Autor correspondiente: lzevaloso@unitru.edu.pe (L. G. Zevallos-Ochoa).

ORCID de los autores:

L. G. Zevallos-Ochoa: <https://orcid.org/0000-0003-4735-0027>

R. E. Salazar-López: <https://orcid.org/0000-0001-6194-1638>

C. E. Honorio-Javes: <https://orcid.org/0000-0002-8917-7085>

M. A. Rojas-Paredes: <https://orcid.org/0000-0002-3570-6885>

RESUMEN

El objetivo del estudio fue analizar la producción científica global sobre forrajes y sistemas ganaderos sostenibles durante el periodo 2015 - 2025. Se realizó un análisis bibliométrico utilizando bases de datos indexadas (Scopus y Web of Science), aplicando criterios de selección y herramientas como VOSviewer y Bibliometrix para evaluar indicadores de productividad, coautoría, co-ocurrencia de palabras clave y redes de citación. Los resultados evidenciaron un crecimiento sostenido de la producción científica, con mayor contribución de países como Estados Unidos, Brasil y China. Las principales líneas de investigación se centraron en la eficiencia alimenticia, el manejo de pasturas, la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y la sostenibilidad de los sistemas ganaderos. Asimismo, se identificó una tendencia creciente hacia enfoques interdisciplinarios. Se concluye que la investigación en este campo ha evolucionado significativamente, destacando áreas prioritarias y vacíos de conocimiento que orientan futuras investigaciones hacia sistemas ganaderos más sostenibles.

Palabras clave: forrajes; ganadería sostenible; análisis bibliométrico; producción científica; sostenibilidad.

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze global scientific production on forages and sustainable livestock systems during the period 2015 - 2025. A bibliometric analysis was conducted using indexed databases (Scopus and Web of Science), applying selection criteria and tools such as VOSviewer and Bibliometrix to evaluate productivity indicators, co-authorship, keyword co-occurrence, and citation networks. The results showed a steady increase in scientific production, with major contributions from countries such as the United States, Brazil, and China. The main research lines focused on feed efficiency, pasture management, greenhouse gas emission mitigation, and sustainability of livestock systems. Additionally, an increasing trend toward interdisciplinary approaches was identified. It is concluded that research in this field has significantly evolved, highlighting priority areas and knowledge gaps that guide future research toward more sustainable livestock systems.

Keywords: forages; sustainable livestock; bibliometric analysis; scientific production; sustainability.

Recibido: 26-02-2026.

Aceptado: 16-05-2026.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCCIÓN

El sector pecuario constituye uno de los pilares estructurantes de la seguridad alimentaria global, con una contribución diferenciada según el nivel de desarrollo económico: representa aproximadamente dos quintas partes del valor agregado agrícola en economías industrializadas, mientras que en naciones en vías de desarrollo su participación se reduce a una quinta parte del mismo indicador (FAO, 2022). Esta dualidad sectorial no obstante converge en una magnitud sociodemográfica trascendental más de mil trescientos millones de seres humanos dependen directa o indirectamente de la ganadería para su subsistencia económica, y el subsector aporta más de un tercio del suministro proteico de origen animal disponible en el planeta (FAO, 2022). La dimensión poblacional del inventario ganadero estimado en mil quinientos millones de bovinos, mil doscientos millones de ovinos y mil millones de caprinos a nivel mundial (FAO, 2025) evidencia la escala de los flujos de biomasa vegetal requeridos para sostener estos sistemas productivos.

No obstante, la expansión de la frontera ganadera enfrenta restricciones estructurales crecientemente severas. La disponibilidad de fitomasa forrajera de calidad superior constituye el cuello de botella más crítico, particularmente en territorios caracterizados por limitaciones hídricas y degradación edáfica (Eeswaran et al., 2022). Múltiples procesos de presión antropogénica incluyendo la desertificación de praderas naturales, la fluctuación creciente de regímenes pluviométricos y la conversión de áreas de pastoreo hacia usos agrícolas intensivos han contraído de manera significativa la oferta de estos recursos fundamentales (Madaki et al., 2025). Paralelamente, fenómenos de erosión eólica, déficit de insumos específicos para la producción forrajera y la intensificación de eventos climáticos extremos particularmente episodios de estrés térmico prolongado han degradado tanto la cantidad como la composición bioquímica de la biomasa disponible para el consumo animal (Adar et al., 2024; Cheng et al., 2022; Wang et al., 2024).

Desde una perspectiva zootécnica, la dieta de los rumiantes se sustenta predominantemente en dos familias botánicas: Poaceae (gramíneas) y Fabaceae (leguminosas). Estos recursos vegetales representan la alternativa alimenticia de menor costo relativo para la producción de carne y leche, constituyendo el sustento nutricional basal que provee fibra dietética, aminoácidos esenciales, micronutrientes liposolubles y elementos minerales a través del consumo de materia seca (Mesquita Da Silva et al., 2016). La magnitud del flujo anual de biomasa procesada por el ganado global estimada en seis mil millones de toneladas métricas de materia seca, de las cuales los pastos constituyen aproximadamente la mitad (FAO, 2022), ilustra la vulnerabilidad sistémica que implica cualquier perturbación en la cadena de suministro forrajero.

Ante este escenario de presión múltiple, la implementación de sistemas tecnificados de producción de fitomasa forrajera emerge como estrategia central para la contención de costos operativos y la transición hacia modelos de producción pecuaria ambientalmente responsables (Ginwal et al., 2019). Evidencias recientes provenientes del cuerno de África ilustran esta trayectoria: programas de mejoramiento genético en *Sorghum bicolor* han permitido el registro de cultivares con fenotipo stay-green, caracterizados por la retención de biomasa foliar post-antesis, los cuales ofrecen potencial significativo como recurso forrajero alternativo en sistemas de doble propósito (Tulu et al., 2025)

La presente revisión sistematiza la investigación científica en forrajes y sistemas ganaderos sostenibles durante el decenio 2015 – 2025, con énfasis en el mapeo de tendencias temáticas y la caracterización de redes de colaboración internacional. Se examinan las estrategias innovadoras orientadas a la intensificación ecológica de la producción forrajera, con el propósito de garantizar la suficiencia alimentaria del ganado rumiante y contribuir a la sostenibilidad ambiental del sector pecuario.

METODOLOGÍA

Estrategia de búsqueda bibliográfica

Se ejecutó una revisión sistematizada de literatura científica con enfoque bibliométrico, orientada al mapeo de la producción investigativa global en forrajes para sistemas pecuarios sostenibles durante el decenio 2015–2025. La extracción de

registros se realizó el 22 de febrero de 2025 en la base de datos Scopus. La estrategia de búsqueda se estructuró mediante ecuaciones Booleanas en campos de título, resumen y palabras clave de autor (Tabla 1).

Tabla 1

Estrategias de búsqueda Booleana por categoría taxonómica de especies objetivo

Categoría	Ecuación de búsqueda	Términos excluidos
General	("sustainable" OR "sustainability") AND ("nutritional" OR "nutrition") AND ("forages" OR "forage" OR "pasture" OR "fodder") AND ("livestock")	—
Caprinos	("sustainable" OR "sustainability") AND ("nutritional" OR "nutrition") AND ("forages" OR "forage") AND ("goat" OR "caprine")	"bovine", "sheep", "ovine", "bos", "cow", "dairy cattle", "cattle"
Bovinos	("sustainable" OR "sustainability") AND ("nutritional" OR "nutrition") AND ("forages" OR "forage") AND ("bovine" OR "cattle" OR "cow" OR "dairy cattle")	"goat", "sheep", "ovine", "caprine"
Ovinos	("sustainable" OR "sustainability") AND ("nutritional" OR "nutrition") AND ("forages" OR "forage") AND ("ovine" OR "sheep")	"goat", "caprine", "bovine", "bos", "cow", "dairy cattle", "cattle"

El operador Booleano OR se aplicó para sinónimos y términos relacionados dentro de cada categoría conceptual; el operador AND vinculó los cuatro dominios temáticos obligatorios: sostenibilidad, nutrición, forrajes y producción animal. No se establecieron restricciones geográficas ni de tipo de sistema de producción. El procesamiento de la base de datos para este estudio, se utilizó principalmente las herramientas VOSviewer y Scimago graphica, complementado con las herramientas de "Bibliometrix" dentro del lenguaje de programación R.

Criterios de elegibilidad y triaje de documentos

La selección de artículos siguió los principios del protocolo PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (Page et al., 2021). Los criterios de inclusión comprendieron: (i) artículos originales de investigación empírica publicados en revistas indexadas en Scopus; (ii) documentos redactados en idioma inglés como *lengua franca* de la ciencia agraria internacional; (iii) estudios con unidad de análisis en sistemas de producción animal rumiante (bovinos, ovinos, caprinos, o especies menores); (iv) investigaciones que abordaran explícitamente dimensiones de sostenibilidad ambiental, eficiencia del uso de recursos, o valoración nutricional de forrajes; (v) documentos con fecha de publicación entre 1 de enero de 2015 y 31 de diciembre de 2025.

Los criterios de exclusión eliminaron: revisiones narrativas sin aporte primario de datos, editoriales de opinión, notas técnicas, cartas al editor, actas de congreso, capítulos de libro, documentos de preprint sin versión publicada, y estudios *in vitro* exclusivos sin validación *in vivo* o en condiciones de campo. Asimismo, se excluyeron investigaciones centradas exclusivamente en monogástricos (porcinos, aves) o en acuicultura.

El proceso de triaje se ejecutó en dos etapas de filtrado: (i) revisión de título y resumen para descarte de irrelevantes; (ii) lectura integral de texto completo para verificación de criterios de elegibilidad. La concordancia entre evaluadores se resolvió mediante discusión consensuada. La tabla 1 ilustra el flujo de documentos según esquema PRISMA: identificación inicial de 124 registros, eliminación de 38 por duplicidad o incumplimiento de criterios formales, y selección final de 86 artículos originales para análisis bibliométrico.

Extracción y sistematización de datos

De los 86 documentos seleccionados se extrajeron metadatos bibliográficos estructurados: información de citación (título, autores, afiliaciones institucionales, país de origen, revista, volumen, páginas, DOI), datos cronológicos (año de publicación), información descriptiva (resumen, palabras clave de autor), detalles de financiamiento (agencias, programas, proyectos), e indicadores de impacto (número de citas recibidas al momento de la extracción). Los datos se exportaron en formato CSV (UTF-8) y se curaron en hoja de cálculo Excel® (Microsoft Office 365) para estandarización de campos y detección de inconsistencias.

Para el procesamiento analítico y visualización científica se ejecutó mediante un ecosistema de herramientas especializadas:

Redes de coautoría y coocurrencia: se empleó la herramienta de VOSviewer versión 1.6.20 (van Eck & Waltman, 2024). La configuración de parámetros fue: umbral mínimo de cuatro documentos por país para inclusión en red de colaboración; umbral mínimo de tres ocurrencias para términos temáticos; algoritmo de agrupamiento por modularidad (*modularity clustering*) con resolución 1.0 para identificación de clusters.

Mapa de colaboración internacional

Para generar el mapa de colaboración internacional en Scimago Graphica se utilizó como base el formato en GML del análisis de redes de coautoría que se realizó en VOSviewer que contiene las publicaciones científicas y redes de coautoría de bases de datos de Scopus de 86 artículos científicos originales que fueron seleccionadas para continuar con el análisis en Scimago Graphica, se abrió la aplicación y se seleccionó "Nuevo Proyecto" se importó el archivo verificando la estructura de los datos, asegurando que cada país estuviera correctamente identificado, luego se seleccionó la opción "Mapa mundial" como base, también añadiendo los datos de conexión entre países, representando las colaboraciones mediante líneas y se asignó una escala de colores a los países en función del número de colaboraciones, con tonos más intensos indicando mayor número de conexiones, ajustando parámetros de diseño, como grosor de las líneas, para mejorar la legibilidad del mapa. Finalmente, la imagen fue exportada en formato PNG para su inclusión en el estudio.

Evolución temática y detección de tendencias

Se utilizó la herramienta Bibliometrix versión 4.2.3 (Aria & Cuccurullo, 2017) en entorno R versión 4.3.1 (R Core Team, 2023), donde se realizó la recopilación de datos bibliográficos a partir de la base datos de Scopus, estos registros obtenidos en CSV de 86 artículos originales en inglés, que fueron seleccionados para su análisis y posteriormente se utilizó el paquete de RStudio, utilizando la función `library(bibliometrix)` y `biblioshiny()`.

Este procedimiento generó la apertura del `biblioshiny` para el análisis, importando el archivo de los documentos seleccionados en Excel formato CSV de Scopus, en la opción *Overview* se observó la información del marco temporal desde 2015 al 2025, con 61 revistas con 86 documentos, con crecimiento anual de 23,11% y coautoría internacional de 36,05%. Por medio de las palabras clave más frecuentes se identificaron los términos predominantes en cada período, para ello se aplicó la función "Network Approach", la cual permitió visualizar cómo ciertos conceptos han ganado o perdido relevancia a lo largo del tiempo, paralelamente, se realizó un análisis de agrupación temática mediante la función "thematic evolution", que segmentó los datos en intervalos de años, facilitando la identificación de cambios en los focos de investigación, posteriormente, se empleó un

análisis de redes de co-ocurrencia de palabras clave para comprender la interconexión entre los términos más relevantes, lo que permitió observar la estructura y evolución de las principales líneas de investigación en el campo, además, con el

propósito de identificar tendencias emergentes en la investigación, se aplicó la función “trendTopics”, la cual destacó los términos que mostraron un incremento en su frecuencia de aparición en los últimos años.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Colaboración científica internacional

El análisis de redes de coautoría reveló una estructura de colaboración científica multipolar en el dominio de la investigación forrajera sostenible. La configuración de la red se estableció con un umbral mínimo de cuatro documentos por país, identificándose diez naciones con participación significativa en la producción científica del período 2015 – 2025.

La visualización geoespacial de interacciones (Figura 1) evidenció una topología de red caracterizada por su alta conectividad transcontinental, con presencia activa de nodos en América, Europa, Asia y África. Esta distribución espacial sugiere que la investigación en sistemas forrajeros ha transitado hacia un paradigma de ciencia globalizada, donde la generación de conocimiento depende crecientemente de alianzas interinstitucionales que trascienden fronteras geoeconómicas.

El análisis de centralidad de la red identificó cuatro países como hubs principales de colaboración: República Popular China (14 documentos), Colombia (13), Brasil (11) y Estados Unidos de América (9). La posición de estos nodos centrales no responde únicamente a volumen de producción, sino a su función de puentes (*brokers*) entre comunidades científicas diferenciadas. China y Etiopía a pesar de la distancia geográfica, mantienen vínculos de coautoría robustos que ilustran la emergencia de corredores científicos Norte-Sur orientados al desarrollo agrícola sostenible. Asimismo, la vinculación de Colombia-Estados Unidos y Brasil-Estados Unidos configuran ejes de cooperación regional-transcontinental de alta intensidad, donde la complementariedad entre experiencia en sistemas tropicales y capacidad tecnológica avanzada genera sinergias investigativas diferenciadas.

La distribución de frecuencias evidencia una estructura asimétrica: mientras China, Colombia y Brasil concentran el 44 % de la producción total (38/86 documentos), España (7), Reino Unido (6), Pakistán (4), Italia (4) y Etiopía (4) exhiben menor volumen, pero alta incidencia en términos de citación por documento, sugiriendo una estrategia de publicación orientada a revistas de alto factor de impacto (*quality over quantity*).

El análisis de modularidad identificó cinco agrupaciones nacionales diferenciadas por afinidad temática: cluster I (codificado en rojo) liderado por Brasil y Estados Unidos que concentra investigaciones en biotecnología forrajera, mejoramiento genético de *Brachiaria* spp. y sistemas de integración agricultura con ganadería.

La interacción entre ambos países refleja la complementariedad entre la experiencia de Brasil en sistemas tropicales y la capacidad de innovación tecnológica de Estados Unidos. En este contexto el intercambio de conocimiento se expresa en el desarrollo y la transferencia de germoplasma y metodologías de evaluación nutricional, lo cual contribuye a fortalecer los sistemas productivos en regiones tropicales (Epifanio et al., 2019; Pasquini Neto et al., 2024).

El cluster II (codificado en morado) con eje en el Reino Unido y Asia del Sur, se centra en mejoramiento genético de leguminosas templadas como *Trifolium pratense* y *Lolium perenne*, así como la conservación de recursos fitogenéticos. La presencia de Pakistán refleja la importancia de la etnobotánica forrajera y la documentación de saberes tradicionales sobre el uso de especies nativas en zonas de alta diversidad biocultural (Harun et al., 2017; De Vega et al., 2015). En el Cluster III (codificado en azul) conformado por China y Etiopía se orienta a estudios de desarrollo (development research), en los que la cooperación internacional se centra en la transferencia tecnológica y el fortalecimiento de capacidades productivas. En este contexto, la participación de China se asocia con iniciativas de apoyo en infraestructura rural y adaptación de tecnologías, mientras que Etiopía representa escenarios de aplicación en ambientes áridos y semiáridos. El sorgo forrajero (*Sorghum bicolor*) y los sistemas de doble propósito constituyen los principales objetos de estudio en esta agrupación (Wang et al., 2024). Cluster IV (codificado en naranja), integrado principalmente por Colombia y España, se especializa en sistemas silvopastoriles tropicales y diversificación de dietas rumiantes mediante el uso de leguminosas arbóreas como *Leucaena leucocephala* y *Gliricidia sepium*. La convergencia entre ambos países se relaciona con la presencia de ecosistemas ganaderos comparables como los bosques seco tropical y llanos orientales, así como la trayectoria investigativa de España en agroforestería (Espitia Buitrago et al., 2021).

Cluster V (codificado en amarillo), representado principalmente por Italia, nodo periférico con baja conectividad Interclúster, este grupo se centra en tecnologías de conservación de forrajes (ensilaje, henificación) y valoración de subproductos agroindustriales. Su relativa baja integración con otros clústeres sugiere una línea de investigación más especializada, posiblemente asociada a las características de los sistemas lecheros intensivos predominantes en este país.

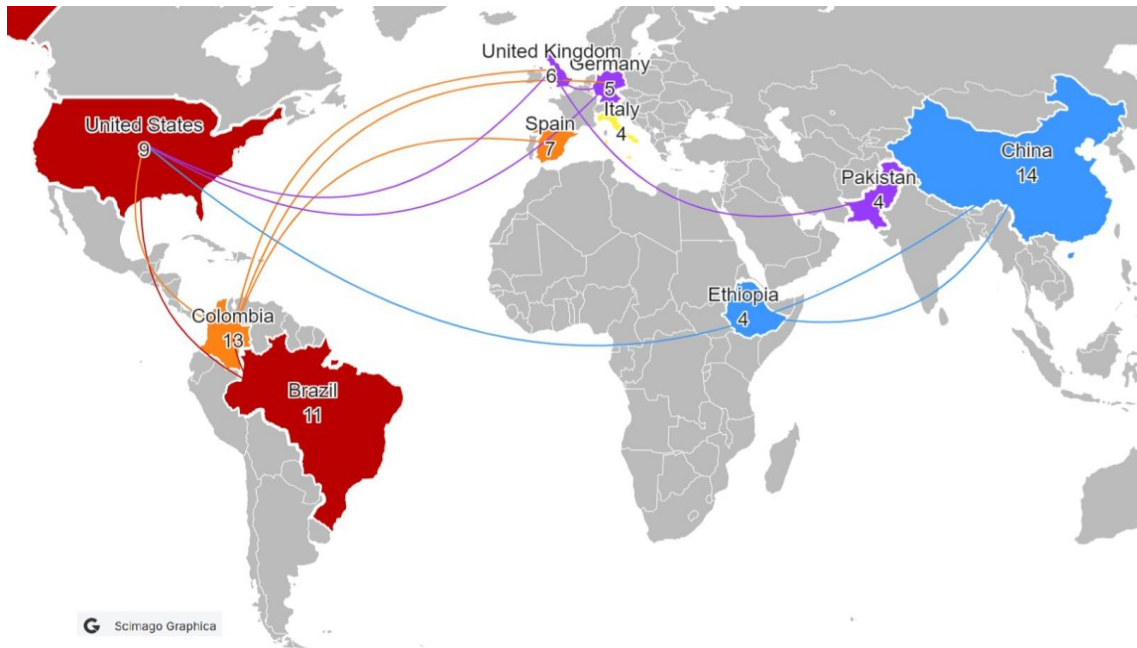


Figura 1. Mapa geográfico de colaboración científica entre países.

Estructura temática de la investigación forrajera: análisis de co-ocurrencia de palabras clave

El mapeo de redes conceptuales a partir de la co-ocurrencia de términos en la literatura científica permite identificar patrones de investigación consolidados y líneas emergentes en un campo disciplinario. Del corpus de 86 documentos analizados se extrajeron 41 términos con frecuencia significativa en campos de título, resumen y palabras clave. La aplicación de un umbral mínimo de tres ocurrencias se seleccionó 29 términos para análisis de redes, los cuales se agruparon en seis clusters temáticos mediante algoritmo de modularidad (Figura 2).

La visualización de redes revela una arquitectura de conocimiento con seis núcleos temáticos diferenciados, caracterizada por alta interconectividad entre dimensiones ecológicas, productivas y ambientales. El nodo central de máxima dimensión corresponde a Forage, confirmando la centralidad del recurso fitomasa como eje estructurante del campo. Los términos Livestock y Sustainability constituyen nodos secundarios de alta centralidad, evidenciando la consolidación de un paradigma de sostenibilidad integrada donde la producción animal se articula con la gestión de recursos forrajeros.

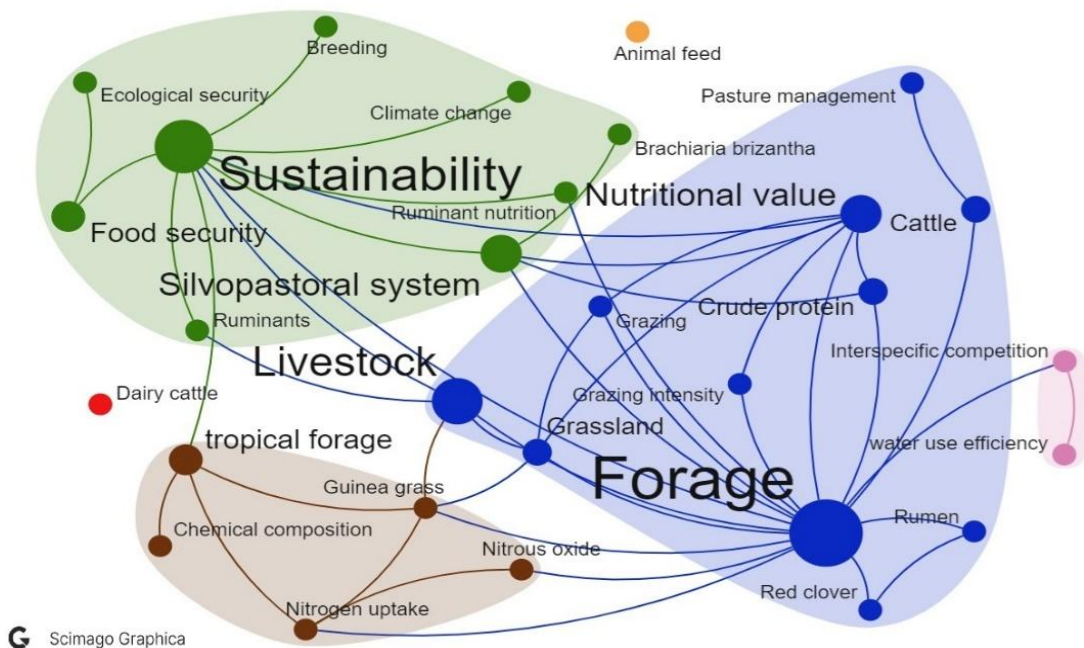


Figura 2. Visualización en red de la co-ocurrencia de palabras clave en investigaciones de la base de datos Scopus (2015 - 2025).

El primer grupo es el Cluster azul, el núcleo temático de mayor densidad de conexiones dentro de la red, integrando términos operativos como *crude protein*, *ruminant nutrition*, *cattle* y *pasture management*, conectándose directamente con el nodo *forage*, lo que evidencia un enfoque centrado en la calidad nutricional del forraje y su relación con la producción animal. La co-ocurrencia de estos términos confirma que la fracción proteica continúa siendo un indicador clave en la evaluación del valor nutritivo, mientras que la incorporación del manejo de pasturas introduce una dimensión aplicada orientada a optimizar la productividad. En este contexto, la gestión de la carga animal y la presión de pastoreo se reconoce como un factor determinante para evitar la degradación de los recursos forrajeros y favorecer la regeneración de las pasturas (Zhai et al., 2018). Asimismo, la integración de especies forrajeras, especialmente gramíneas y leguminosas, contribuye a mejorar la eficiencia en el uso de los recursos y el rendimiento productivo, además de reducir la intensidad de emisiones de metano en los sistemas ganaderos (Zhai et al., 2018; Gaviria-Urbe et al., 2020).

El **cluster verde** articula términos de alta relevancia contemporánea como *sustainability*, *food security*, *climate change* y *silvopastoral system*, con *sustainability* como nodo central de la red. La configuración de estos términos refleja una transición hacia enfoques agroecosistémicos, en los que la producción forrajera se integra con la seguridad alimentaria y la adaptación al cambio climático.

La co-ocurrencia de *climate change* con *breeding* sugiere el desarrollo de líneas de investigación orientadas a la obtención de genotipos forrajeros más resilientes frente a condiciones de estrés térmico y variabilidad hídrica. Asimismo, la asociación con *silvopastoral system* evidencia el papel de estos sistemas como estrategias que contribuyen no solo a la productividad, sino también a la provisión de servicios ecosistémicos, como la regulación climática y la conservación de la biodiversidad.

En este contexto, la sostenibilidad se vincula tanto con la eficiencia en el uso de recursos como con la reducción del impacto ambiental en los sistemas ganaderos (Azimi et al., 2013; Crotty et al., 2014).

El **clúster marrón** agrupa términos de especialización taxonómica y bioquímica, como *tropical forage*, *guinea grass*, *chemical composition*, *nitrogen uptake* y *nitrous oxide*, lo que refleja un enfoque centrado en la eficiencia del uso del nitrógeno en sistemas de pastoreo tropical. La cohesión temática de este núcleo evidencia el interés por comprender la dinámica del nitrógeno y su relación con las emisiones de gases de efecto invernadero.

La presencia de *guinea grass* (*Megathyrus maximus*) como especie representativa de forrajes tropicales, en asociación con *nitrogen uptake*, sugiere investigaciones orientadas a la absorción y utilización del nitrógeno por las plantas en sistemas de producción intensivos. En este contexto, el manejo del nitrógeno incluyendo su disponibilidad en el suelo y su aprovechamiento

por las especies forrajeras se reconoce como un factor clave en la generación de emisiones de óxidos de nitrógeno, particularmente en sistemas dominados por gramíneas tropicales (Grassmann et al., 2020).

El **clúster rosado** de baja densidad nodal pero alta especificidad, se localiza en la periferia de la red, lo que contrasta con su creciente relevancia en el contexto del cambio climático. Este agrupa términos como *water use efficiency* e *interspecific competition*, asociados a la disponibilidad hídrica como uno de los principales factores limitantes en sistemas ganaderos de zonas áridas y semiáridas. La co-ocurrencia de estos términos sugiere una línea de investigación orientada a comprender la partición del agua entre especies forrajeras, particularmente en sistemas mixtos de gramíneas y leguminosas, donde las diferencias en la arquitectura radicular y la fenología permiten optimizar la captación de agua y fortalecer la resiliencia productiva.

El **clúster rojo** representado principalmente por *dairy cattle*, presenta baja conectividad dentro de la red, indicando una especialización temática relativamente independiente. Este patrón sugiere que la investigación en sistemas lecheros intensivos, basados en dietas confinadas y altos niveles de productividad, se desarrolla de manera diferenciada respecto a los sistemas pastoriles. Esta segmentación evidencia la dualidad estructural del sector ganadero, con marcadas diferencias entre sistemas intensivos del norte global y sistemas extensivos del sur global en términos de recursos, nivel tecnológico y enfoques de sostenibilidad.

Por su parte el **clúster naranja**, asociado al término *animal feed*, también se ubica en la periferia de la red y mantiene una conexión directa con *nutritional value* del clúster azul, esta posición sugiere una conceptualización del forraje como insumo dentro de sistemas intensificados, en contraste con el enfoque pastoril que concibe como un recurso renovable integrado al ecosistema. La limitada articulación con términos relacionados con sostenibilidad y cambio climático indica que esta línea de investigación ha incorporado de manera parcial los enfoques agroecológicos predominantes en el resto de la red.

Evolución temática de la investigación forrajera (2015–2025)

El análisis de la evolución temática de la investigación en forrajes y sistemas ganaderos sostenibles durante el periodo 2015 – 2025, a partir de datos de Scopus procesados con Bibliometrix y visualizados mediante diagramas de Sankey (Figura 3), evidenció cambios progresivos en los enfoques de investigación. En el periodo 2015–2018 predominan términos asociados a la caracterización nutricional, como *conservation*, *nitrogen*, *crude protein* y *nutritive value*, sugiere un énfasis en la evaluación de la calidad del forraje y la conservación de biomasa, especialmente en condiciones de limitada disponibilidad hídrica. Posteriormente en el periodo 2019 – 2022 se observa un desplazamiento hacia términos como

forage quality, legumes, rumen fermentation y *food security*, reflejando una mayor atención a los procesos digestivos, la eficiencia en la utilización de nutrientes y la diversificación de especies forrajeras. Los flujos temáticos muestran continuidad desde *nitrogen* y *crude protein* hacia *legumes* y *nutritional quality*, evidenciando un cambio hacia el uso de leguminosas como estrategia para mejorar la nutrición animal. Finalmente, en el periodo 2023–2025 destacan términos como *climate change*, *methane emission*, *animal welfare* y *sustainability*, lo que indica una orientación hacia la integración de criterios ambientales y de bienestar animal. En conjunto, estos resultados evidencian una transición desde enfoques centrados en la calidad nutricional hacia perspectivas amplias que incorporan sostenibilidad y adaptación al cambio climático.

Los resultados obtenidos en la Figura 3 evidencian una evolución coherente con las tendencias actuales en la investigación ganadera. El predominio inicial de términos relacionados con la composición química confirma que la caracterización nutricional ha sido una base fundamental en el estudio de los forrajes. Posteriormente, el desplazamiento hacia términos como *legumes* y *rumen fermentation* refleja una mayor atención a los procesos digestivos y a la eficiencia en la utilización de nutrientes, en concordancia con estudios que destacan el papel de las leguminosas en la mejora del aporte proteico y del uso del nitrógeno (Shri Rangasami et al., 2024). En los años más recientes, la incorporación de términos como *climate change*, *methane emission* y *animal welfare* evidencia una ampliación del enfoque hacia la sostenibilidad de los sistemas ganaderos, donde la eficiencia en el uso de nutrientes se reconoce como un factor clave para reducir el impacto ambiental (Chojnacka et al., 2021). En este contexto, la transición observada posiciona a la investigación forrajera contemporánea frente al desafío de incrementar la producción de proteína animal para una población en crecimiento, estimada en 9,700 millones para el año 2050 (United Nations, 2019), esta situación ha sido descrita como una “gran transformación” de la

agricultura global (Foley et al., 2011; Willett et al., 2019). La evidencia bibliométrica obtenida en este estudio sugiere que el campo de investigación está respondiendo a este desafío mediante la incorporación progresiva de dimensiones como el cambio climático, la sostenibilidad y el bienestar animal, integrándolas en el núcleo del análisis científico.

Forrajes y sostenibilidad: dimensiones ambientales y productivas

La articulación entre la producción de biomasa forrajera y los principios de sostenibilidad constituye uno de los ejes estructurantes de la investigación contemporánea en ciencias animales. Esta relación se operationaliza mediante dos dimensiones interdependientes: la optimización de la eficiencia de conversión de recursos naturales en productos animales, y la minimización de las externalidades ambientales asociadas a la actividad ganadera. Los sistemas de producción forrajera, cuando se diseñan bajo criterios agroecológicos, pueden contribuir a la transición hacia modelos de agricultura regenerativa que simultáneamente incrementan la productividad y reducen la huella ecológica (Allen et al., 2011; Lemaire et al., 2014).

La eficiencia productiva y alternativas forrajeras adaptadas como la selección de genotipos forrajeros con alta digestibilidad y balance favorable entre rendimiento de biomasa y calidad nutricional representa una estrategia de intensificación sostenible. El híbrido Cuba OM-22 (*Pennisetum purpureum* × *P. glaucum*), desarrollado para condiciones edafoclimáticas de la región Amazónica, ejemplifica esta aproximación por su contenido de materia seca, fracciones de fibra moderadas y digestibilidad de la pared celular lo posicionan como recurso estratégico para sistemas de doble propósito en ecosistemas de alta pluviosidad y suelos ácidos. La adaptación de especies forrajeras a nichos agroecológicos específicos reduce la dependencia de insumos externos y fortalece la resiliencia productiva frente a la variabilidad climática.

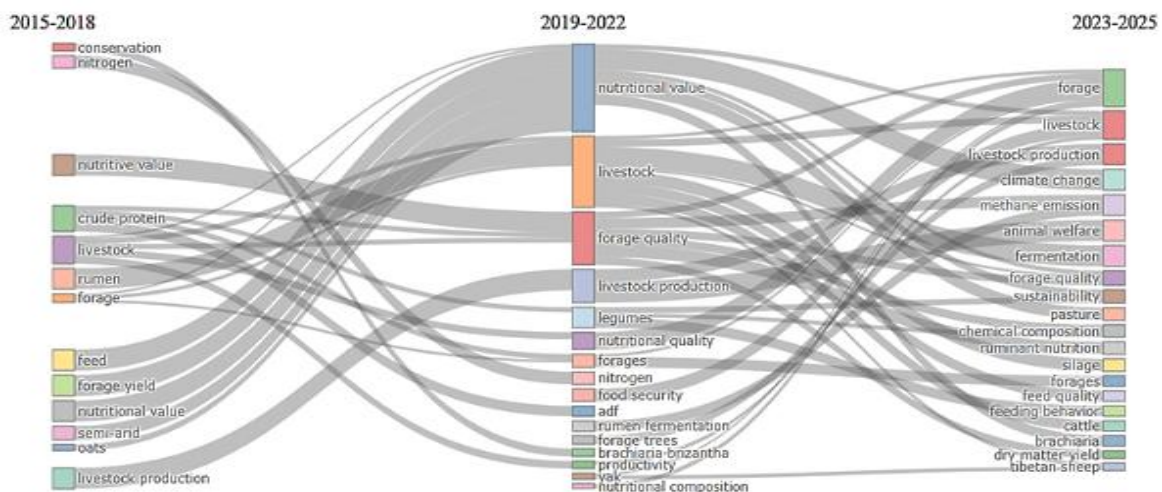


Figura 3. Evolución temática de la investigación científica en forrajes y sistemas ganaderos sostenibles en la última década de la base de datos Scopus (2015 - 2025).

La mitigación de emisiones de metano utilizando estrategias dietéticas y bioquímicas, por ejemplo la contribución de la ganadería rumiante a las emisiones antropogénicas de metano (CH₄) estimada en 5,0% – 5,5% del total global ha orientado la investigación forrajera hacia la identificación de estrategias de mitigación mediante manipulación de la dieta, la evidencia acumulada indica que la inclusión de fuentes lipídicas protegidas (oleaginosas) en la ración puede reducir la producción de CH₄ entérico en 10–15%, aunque con compensaciones potenciales, la suplementación con grasas puede deprimir la fermentación ruminal de la fibra, reducir la ingesta voluntaria de materia seca y alterar la composición lipídica de la leche, particularmente la fracción de ácidos grasos insaturados de cadena larga (Adeniji et al., 2025). Por otro lado, la comparación entre sistemas de conservación de forrajes revela diferencias significativas en el potencial de emisión como el ensilado de maíz (*Zea mays*) exhibe menor intensidad de CH₄ por unidad de energía digestible que el ensilado de alfalfa (*Medicago sativa*) o leguminosas frescas, con reducciones estimadas del 5% – 15% en sistemas lecheros intensivos (Gislon et al., 2020). Esta ventaja se atribuye a la mayor concentración de almidón y menores fracciones de proteína degradable en el rumen, que modifican la vía de fermentación hacia propionato y reducen la producción de hidrógeno disponible para arqueas metanogénicas.

La exploración de especies forrajeras no convencionales con metabolitos secundarios bioactivos ha identificado alternativas prometedoras, el *Plantago lanceolata* (llantén) y *Brassica napus* (colza forrajera) contienen saponinas y glucosinolatos con actividad inhibitoria de la metanogénesis ruminal. No obstante, su inclusión en dietas superiores al 20% – 30% de la materia seca puede comprometer la digestibilidad de la fibra y la palatabilidad, requiriendo validación de su impacto neto en la productividad animal a largo plazo (Della Rosa et al., 2022; Eugène et al., 2021).

Las estrategias de manipulación dietética incluyendo forrajes de alto contenido de azúcar soluble o genotipos modificados para acumulación de lípidos presentan rangos de mitigación del 10% – 15% en condiciones de pastoreo, mientras que los aditivos alimentarios (inhibidores de metanogénesis, taninos condensados, aceites esenciales) pueden alcanzar reducciones del 60% en sistemas confinados intensivos. La integración de estas intervenciones podría reducir la huella de carbono de la leche en 15% – 26% en escenarios óptimos de adopción tecnológica (Hristov, 2023).

La asociación de especies forrajeras de distinta familia botánica particularmente la combinación de gramíneas C₄ con leguminosas tropicales constituye una estrategia de intensificación ecológica con múltiples beneficios ambientales, esta práctica documentada desde mediados del siglo XX pero revalorizada en el contexto de la sostenibilidad climática, aprovecha la

complementariedad funcional, como las leguminosas fijan nitrógeno atmosférico mediante simbiosis con *Rhizobium* spp., reduciendo la dependencia de fertilizantes sintéticos y mejorando la calidad proteica del forraje disponible; las gramíneas, por su parte, aportan biomasa voluminosa, cobertura edáfica continua y eficiencia en el uso del agua (Epifanio et al., 2019; Fioreli et al., 2018).

Los sistemas de cultivos intercalados o en asociación presentan externalidades ambientales positivas cuantificables como la reducción de emisiones de óxido nitroso (N₂O) por unidad de producción, disminución de la erosión hídrica y eólica, incremento de la materia orgánica del suelo, y mayor resiliencia climática ante eventos de sequía o saturación hídrica (Gil et al., 2018). La diversificación taxonómica de los pastizales, además de sus beneficios biofísicos, reduce el riesgo productivo asociado a la dependencia de monocultivos y facilita la adaptación a condiciones de mercado fluctuantes.

Tensiones y compensaciones en la sostenibilización de sistemas forrajeros

La evidencia revisada revela que la transición hacia sistemas forrajeros sostenibles no está exenta de contradicciones, la mitigación de emisiones de CH₄ mediante suplementación lipídica puede comprometer la calidad nutricional de los productos lácteos; la inclusión de leguminosas con metabolitos secundarios reduce la metanogénesis pero puede afectar la digestibilidad; la intensificación de sistemas silvopastoriles requiere inversiones en infraestructura y capacitación que no siempre son accesibles para pequeños productores, estas tensiones señalan que la sostenibilidad no puede concebirse como atributo técnico universal, sino como proceso contextual de negociación entre objetivos productivos, ambientales y socioeconómicos (Maduro Días et al., 2023; Nunes et al., 2022). La agenda investigativa futura debería priorizar la cuantificación de estas compensaciones en condiciones de campo, el desarrollo de indicadores integrados de sostenibilidad que articulen dimensiones biofísicas, económicas y sociales, el diseño de políticas públicas que incentive la adopción de prácticas forrajeras regenerativas mediante mecanismos de pago por servicios ecosistémicos.

Forrajes y eficiencia del uso del agua: dimensiones de sostenibilidad hídrica

La visualización conceptual de la Figura 4 articula cinco dimensiones interdependientes de la sostenibilidad en sistemas de producción de biomasa forrajera: calidad nutricional, impacto ambiental, emisiones de gases de efecto invernadero, investigación y desarrollo, esta configuración radial evidencia que la sostenibilidad forrajera no constituye un atributo unidimensional, sino un sistema complejo donde la gestión del agua interactúa con la optimización nutricional, la mitigación climática y la innovación tecnológica.



Figura 4. Beneficios ambientales y productivos de los sistemas de producción de forrajes.

Gestión hídrica en contextos de restricción climática

La eficiencia del uso del agua (EAU) emerge como variable crítica en la viabilidad de los sistemas forrajeros, particularmente en regiones caracterizadas por déficit hídrico estructural o estacional, la investigación contemporánea ha intensificado su atención hacia tecnologías de riego "climáticamente inteligentes" aquellas que simultáneamente incrementan la productividad, adaptan a la variabilidad climática y reducen las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al bombeo y distribución de agua. Estas tecnologías se configuran como componentes esenciales de sistemas forrajeros resilientes, capaces de mantener la provisión de servicios ecosistémicos bajo escenarios de estrés hídrico creciente (Ghalkhani et al., 2023; Montazar & Afshar, 2025). La comparación de métodos de riego evidencia diferencias significativas en la eficiencia de conversión de agua en biomasa. El riego por goteo subterráneo, combinado con programación de aplicaciones basada en la evapotranspiración de referencia (ET_0), ha demostrado rendimientos de forraje superiores y EAU incrementada respecto a sistemas de riego superficial por gravedad. La coincidencia entre el 100% de la evaporación potencial y la aplicación hídrica real lograda mediante sensores de humedad del suelo y modelos agrometeorológicos optimiza la función de producción de la planta sin generar lixiviación de nutrientes ni saturación edáfica (Gutiérrez-Guzmán et al., 2022).

La eficiencia del uso del agua EAU exhibe variabilidad sustancial entre especies forrajeras y dentro de estas, también entre genotipos de distinto origen y arquitectura vegetativa. Estudios comparativos en *Cenchrus purpureus* (pasto elefante) han documentado que genotipos de porte elevado presentan mayor eficiencia de uso del agua y acumulación de biomasa que genotipos enanos o de crecimiento reducido, bajo condiciones de riego complementario, esta ventaja se atribuye a la mayor profundidad del sistema radical, la mayor superficie foliar expuesta a la radiación fotosintéticamente activa y la mayor capacidad de exploración del volumen edáfico disponible (Ribeiro et al., 2023).

La selección de especies forrajeras debe considerar, además de la EAU intrínseca, la complementariedad fenológica y arquitectónica en sistemas de asociación. La combinación de gramíneas C_4 de alta eficiencia fotosintética con leguminosas de profundidad radical diferenciada permite la explotación estratificada del recurso hídrico, reduciendo la competencia interespecífica directa y aumentando la eficiencia del uso del suelo y el agua a nivel de sistema.

Integración de factores en la optimización de la eficiencia del uso del agua (EAU)

La eficiencia del uso del agua en sistemas forrajeros es un proceso multivariado influenciado por factores genéticos, fisiológicos, ambientales y de manejo, incluyendo la arquitectura radical, la conductancia estomática y las condiciones edafoclimáticas (Kang et al., 2025; Ye et al., 2024; Hatfield & Dold, 2019). Esta tendencia hacia la intensificación ecológica del uso del agua reduciendo el impacto ambiental por unidad de producto animal se alinea con la transición paradigmática identificada en el análisis de evolución temática, donde la eficiencia en el uso de recursos naturales se consolida como eje estructurante de la investigación forrajera contemporánea. La integración de la dimensión hídrica con las demás dimensiones de sostenibilidad representadas en la Figura 4 nutricional, ambiental, climática e innovadora configura un marco holístico para el diseño de sistemas de producción animal resilientes y regenerativos.

Producción y valoración nutricional de la biomasa forrajera

La calidad nutricional de los forrajes constituye el determinante proximal de la productividad animal en sistemas de pastoreo, mediando la expresión del potencial genético del ganado mediante mecanismos de regulación del consumo voluntario, la cinética de fermentación ruminal y la eficiencia de utilización metabólica de nutrientes. La composición bioquímica de la fitomasa ingerida particularmente la relación entre fracciones de fibra, proteína y componentes solubles condiciona la tasa de paso de la digesta, la producción de proteína microbiana y el balance energético del animal,

configurando así el techo de producción alcanzable en condiciones de manejo determinadas.

La fracción de fibra detergente neutra (FDN) representa el componente mayoritario de la pared celular de especies forrajeras, y su digestibilidad constituye el predictor más robusto del consumo voluntario de materia seca en rumiantes tropicales. Investigaciones recientes han establecido correlaciones positivas significativas entre la digestibilidad *in vitro* de la FDN y el incremento de la producción de proteína microbiana ruminal, mejorando la disponibilidad de aminoácidos absorbibles en el intestino delgado y la eficiencia de conversión de energía metabolizable en productos lácteos o cárnicos (Detmann et al., 2024). La cinética de degradación de la fibra, modulada por el grado de lignificación y la arquitectura de los tejidos esclerenquimáticos, determina la sincronía entre la liberación de energía fermentativa y la captación de nitrógeno amoniacal por la microbiota ruminal (de Paula et al., 2024).

La calidad forrajera evaluada mediante parámetros bromatológicos integrales, materia seca, proteína cruda, cenizas, fibra detergente neutra y ácida, condiciona la eficiencia de aprovechamiento de nutrientes y el desempeño productivo de los rumiantes. La biodisponibilidad de macro y micronutrientes esenciales depende no solo de su

concentración en la fitomasa, sino de las interacciones con componentes antinutricionales (taninos condensados, saponinas, oxalatos) y de la cinética de liberación durante la fermentación ruminal. Deficiencias o desequilibrios en la composición química del forraje pueden comprometer funciones metabólicas críticas: crecimiento somático, eficiencia reproductiva, inmunocompetencia y homeostasis fisiológica, generando pérdidas económicas sustanciales en sistemas de producción extensivos donde la suplementación es limitada (Fenetahun et al., 2021; Toledo et al., 2024). Asimismo, revisiones recientes resaltan que la optimización de la calidad nutricional del forraje es un componente clave para mantener la salud animal y mejorar la productividad en sistemas ganaderos sostenible (Wróbel et al., 2025).

Diversificación de recursos forrajeros

La Tabla 2 sistematiza la composición nutricional de especies forrajeras con potencial de inclusión en dietas de rumiantes, diferenciando recursos convencionales de alternativas no tradicionales. Esta recopilación de forrajes evidencia la amplia variabilidad interespecífica en parámetros de calidad, permitiendo la formulación de estrategias de alimentación contextualizadas según limitaciones productivas y disponibilidad de recursos.

Tabla 2

Composición nutricional de especies forrajeras con mejor producción reportados en estudios indexados

Forraje (especies)	MS %	PC %	FDN %	FDA %	Ceniza %	Referencia
<i>Hedysarum coronarium</i> L.	16,00	15,40	40,10	35,70	10,6	Piccirillo et al. (2025)
<i>Camelina sativa</i> L.	25,42	10,02	52,30	43,44	7,67	
<i>Linum usitatissimum</i> L.	25,02	11,78	68,47	55,15	5,74	Tassone et al. (2025)
<i>Amaranthus caudatus</i> L.	16,00	10,50	51,50	34,91	15,31	
<i>Moringa oleifera</i>	26,00	22,90	29,40	17,60	11,20	
<i>Leucaena leucocephala</i>	23,00	17,50	64,60	45,00	7,30	Ammar et al. (2024)
<i>B. bituminosa</i>	-	20,90	38,40	19,00	9,60	
<i>C. viminalis</i>	-	19,70	37,00	19,90	9,30	
<i>C. ciliaris</i>	-	7,60	64,50	38,20	11,50	Pérez-Reverón et al. (2024)
<i>P. coeruleus</i>	-	31,50	58,50	28,90	13,30	
<i>C. salsoides</i>	-	18,90	22,70	14,80	8,50	
<i>C. sventenii</i>	-	14,20	24,70	14,90	19,10	
<i>Calliandra calothyrsus</i>	91,80	21,10	17,40	11,70	-	
<i>Chloris gayana</i>	82,20	5,60	73,00	40,00	-	Mwangi et al. (2024)
<i>L. purpureus</i>	-	18,20	36,90	24,10	9,00	
<i>T. terrestres</i>	-	31,30	24,20	17,90	12,90	Cooke et al. (2024)
<i>A. hispidum</i>	-	25,90	30,40	20,30	11,90	
<i>Tithonia diversifolia</i> Helms	26,00	14,50	54,65	42,22	-	Hernández-Arboleda et al. (2024)
<i>Manihot esculenta</i> Crantz	-	19,00	-	-	6,00	Tamara et al. (2025)
<i>Pennisetum setaceum</i>	18,44	16,61	80,39	41,36	16,10	
<i>Ricinus communis</i>	19,16	24,51	24,91	20,07	9,29	
<i>Arundo donax</i>	23,56	15,69	71,93	35,66	10,76	Maduro Días et al. (2023)
<i>Acacia melanoxylon</i>	39,43	16,99	64,01	52,22	5,26	
<i>Pitopsis undulatum</i>	33,37	7,84	39,31	35,72	8,14	
<i>Hedychium gardnerianum</i>	11,89	8,78	72,39	42,48	11,62	
<i>Acacia melanoxylon</i>	39,51	16,86	64,08	52,21	5,22	
<i>Arundo donax</i>	24,40	16,86	70,34	33,44	10,73	
<i>Cryptomeria japonica</i>	36,45	6,54	46,77	33,43	4,67	Nunes et al. (2022)
<i>Hedychium gardnerianum</i>	13,40	12,03	71,55	36,09	11,33	
<i>Pitopsis undulatum</i>	33,43	7,96	38,02	35,59	7,87	
<i>Megathyrus maximus cv Tanzania</i>	-	8,73	78,90	44,30	10,50	
<i>Cenchrus ciliaris</i> L.	-	7,90	77,20	47,30	9,60	Sosa-Montes et al. (2022)
<i>Ixophorus unisetus</i>	-	7,60	73,50	48,30	11,10	
<i>Megathyrus maximus cv Guinea</i>	-	12,90	74,80	39,10	11,60	
<i>Pennisetum purpureum Schumach x Pennisetum glaucum L. - Cuba OM 22</i>	12,85	14,20	56,29	34,67	19,40	Morocho et al. (2023)

MS: Materia seca, MO: Materia orgánica, PC: Proteína cruda, FDN: Fibra detergente neutro, FDA: Fibra detergente ácido.

Leguminosas arbóreas de alto valor proteico

Las especies *Calliandra calothyrsus* (21,10% PC, 17,40% FDN) y *Leucaena leucocephala* (17,50% PC, 64,60% FDN) se posicionan como recursos estratégicos para la suplementación proteica en sistemas con déficit de nitrógeno dietético. La concentración de proteína cruda superior al 18%, combinada con fracciones de fibra moderadas, confiere a estas leguminosas capacidad de corrección de desbalances en pastizales de base gramínea. No obstante, la presencia de mimosina en *L. leucocephala* y de taninos condensados en *C. calothyrsus* requiere manejo de la frecuencia de defoliación y la proporción en la dieta para evitar efectos antinutricionales. Estas especies contribuyen además a la eficiencia del uso del nitrógeno a nivel de sistema y a la reducción de emisiones de metano entérico por unidad de materia seca ingerida (Harrison et al., 2015).

Gramíneas de alto rendimiento de biomasa

El híbrido Cuba OM-22 (*Pennisetum purpureum* × *P. glaucum*, 14,20% PC, 56,29% FDN) y *Pennisetum purpureum* (16,61% PC, 80,39% FDN) representan alternativas para sistemas de corte y transporte o pastoreo rotacional intensivo. El balance entre proteína y fibra del híbrido Cuba OM-22 con menor contenido de FDN que el genotipo parental *P. purpureum* evidencia el potencial del fitomejoramiento para optimizar la relación rendimiento-digestibilidad. Estas gramíneas C₄ aseguran volúmenes de biomasa elevados, aunque requieren suplementación nitrogenada o asociación con leguminosas para satisfacer los requerimientos de rumiantes de alta producción (Morocho et al., 2023; Vargas et al., 2023).

Especies no convencionales y adaptación a nichos agroecológicos

La diversificación del portafolio forrajero mediante especies marginales tradicionales o introducidas responde a la necesidad de reducir costos de alimentación y adaptarse a condiciones ambientales restrictivas. *Moringa oleifera* (22,90% PC, 29,40% FDN) destaca por su excepcional concentración proteica y bajo contenido de fibra, posicionándola como suplemento estratégico en sistemas tropicales secos. *Tithonia diversifolia* (girasol mexicano, 14,50% PC, 54,65% FDN) y *Manihot esculenta* (yuca, 19,00% PC) ofrecen alternativas para zonas de baja fertilidad edáfica, aunque su disponibilidad estacional y la necesidad de procesamiento limitan su adopción sistemática (Ammar et al., 2024; Hernández-Arboleda et al., 2024; Tamara et al., 2025).

Especies con valores intermedios de fibra como *Gliricidia sepium* y *Acacia melanoxydon* refuerzan la importancia de la diversificación taxonómica en sistemas ganaderos, contribuyendo a la resiliencia productiva frente a variaciones estacionales en la oferta de forraje. *Opuntia ficus-indica* (nopal) emerge como recurso estratégico en zonas áridas por su aporte energético, contenido de agua y adaptación a condiciones de estrés hídrico extremo, alineándose con estrategias de adaptación al cambio climático.

Limitaciones y oportunidades de la diversificación forrajera

La principal restricción para la incorporación de forrajes no convencionales radica en su disponibilidad espacial y temporal limitada, así como en la escasez de información sobre su palatabilidad, toxicidad potencial y efectos en la calidad de productos derivados. La investigación futura debería priorizar la caracterización bromatológica completa de germoplasma nativo marginado, la evaluación de sinergias en mezclas de especies, y el desarrollo de tecnologías de conservación que extiendan la ventana de utilización de recursos forrajeros estacionales (Wróbel et al., 2025).

Dinámica de la producción científica y liderazgo en investigación

El análisis bibliométrico evidencia un crecimiento sostenido de la producción científica en el campo forrajero, con una tasa anual del 23,11% durante el periodo 2015–2025. Este incremento refleja la creciente relevancia del tema en las agendas de investigación, así como la evolución del campo desde estudios centrados en la composición bioquímica hacia enfoques orientados a la sostenibilidad de los sistemas ganaderos. La concentración de publicaciones en los últimos cinco años sugiere una fase de rápida actualización del conocimiento, caracterizada por la incorporación de herramientas como la teledetección, la modelación predictiva y enfoques integrados de análisis.

El mapeo de la producción científica permitió identificar autores con alta productividad e impacto que han contribuido a la consolidación de líneas de investigación específicas. Entre ellos, Tahir et al. (2024) han abordado la degradabilidad de la fibra en sistemas cereal leguminosa en regiones subtropicales; Wang et al. (2024) han desarrollado modelos para optimizar la eficiencia en el uso de recursos en cultivos mixtos; y Kotowski et al. (2023) han analizado la evolución de indicadores forrajeros en Europa a largo plazo. Estos aportes se desarrollan en redes de colaboración internacional, con una fuerte presencia de instituciones en Estados Unidos, Brasil y China, lo que evidencia la concentración de capacidades científicas en contextos con mayor disponibilidad de financiamiento, infraestructura y demanda productiva.

Implicaciones para la investigación futura

El análisis de co-ocurrencia de términos y la evolución temática temporal permiten identificar tres dominios prioritarios para la consolidación de la agenda investigativa venidera:

Sistemas silvopastoriles de la intensificación sostenible a la regeneración ecosistémica, la convergencia semántica entre la palabra forage, sustainable intensification y silvopastoral systems señala la consolidación de los sistemas agroforestales ganaderos como paradigma de producción regenerativa. Estos sistemas, que integran estratos arbóreos, herbáceos y componente animal, promueven la sostenibilidad a

largo plazo mediante la provisión de múltiples servicios ecosistémicos; secuestro de carbono en biomasa leñosa y suelo, regulación de microclima, diversificación de la oferta alimenticia y reducción de riesgos productivos. La efectividad de estos sistemas depende críticamente de prácticas de manejo que equilibren la competencia por recursos luminosos, hídricos y edáficos entre árboles y pastos como el pastoreo rotacional racionalizado, la poda selectiva de copas, raíces y la selección de especies arbóreas de arquitectura compatible con la maquinaria de cosecha de forrajes (Paciullo et al., 2024; Vieira Junior et al., 2022).

La evidencia acumulada documenta mejoras en la calidad nutricional del forraje bajo dosel arbóreo por efecto de sombra parcial sobre la lignificación de tejidos, incrementos en la sostenibilidad ambiental medida por indicadores de biodiversidad y balance hídrico, beneficios económicos diversificados por la producción de madera, frutas o productos forestales no maderables (Sow et al., 2024). La investigación futura requiere estudios de largo plazo (>10 años) que cuantifiquen la dinámica de acumulación de carbono en sistemas silvopastoriles tropicales, desarrollen protocolos de manejo adaptados a condiciones edafoclimáticas específicas, y evalúen la viabilidad económica de la transición desde sistemas de pastoreo abierto hacia configuraciones agroforestales.

Eficiencia en la captación y metabolismo de nutrientes

La fuerte co-ocurrencia entre nitrogen uptake y tropical forages identifica la necesidad de profundizar en la fisiología de la adquisición de nutrientes en especies forrajeras de regiones cálidas. La maximización de la absorción de nitrógeno y su conversión eficiente en proteína vegetal digestible constituye una vía de intensificación ecológica que reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos y la externalidad ambiental de la lixiviación de nitratos.

La edad fisiológica del forraje al momento de la defoliación emerge como variable crítica de manejo: estudios de cinética de crecimiento demuestran que la madurez del tejido vegetal determina profundamente el balance entre rendimiento de biomasa y calidad nutricional, con implicaciones directas en el potencial de emisión de metano entérico por unidad de energía metabolizable ingerida. La identificación del estado óptimo de cosecha que maximice la ganancia animal y minimice la huella de carbono requiere la integración de modelos de predicción del valor nutritivo basados en el estado fenológico y las condiciones ambientales de crecimiento (Khan et al., 2017). La estacionalidad en el aporte nutricional, particularmente marcada en sistemas

de pastoreo extensivo con precipitación concentrada, demanda el desarrollo de estrategias de conservación que aseguren la uniformidad de la oferta alimenticia a lo largo del ciclo anual (Cooke et al., 2024; Carvajal-Tapia et al., 2021).

Retos estructurales y transición hacia la sostenibilidad

La adaptación de los sistemas forrajeros al cambio climático constituye el desafío estructural de mayor magnitud para la investigación y la política agropecuaria. Las proyecciones de escasez hídrica creciente, la intensificación de olas de calor y la mayor frecuencia de eventos climáticos extremos amenazan la viabilidad de los sistemas productivos actuales especialmente en regiones tropicales y subtropicales. En este contexto, las estrategias de producción de forrajes deben incorporar criterios de resiliencia climática, tales como la diversificación de especies, la flexibilidad en los calendarios de siembra y cosecha considerando la gestión eficiente de los recursos hídricos (Shit, 2019).

La mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero particularmente el metano entérico de la fermentación ruminal y el óxido nitroso derivado de la fertilización y manejo de excretas, constituyen un eje central en la agenda ambiental global. La producción ganadera contribuye de manera significativamente a estas emisiones, por lo que las crecientes exigencias regulatorias y de mercados orientados a sistemas bajos en carbono impulsan la transformación de prácticas productivas. En este sentido la intensificación sostenible (entendida como el incremento de la producción por unidad de recurso utilizado con menor impacto ambiental) se posiciona como estrategia central para enfrentar estos desafíos (Peters et al., 2013; Place, 2024).

Por otro lado, las prácticas de rehabilitación de tierras degradadas mediante la incorporación de leguminosas forrajeras, la implementación de sistemas de pastoreo racionalizado y la recuperación de la cobertura vegetal en áreas de pastoreo extensivo, pueden contribuir simultáneamente al aumento de la productividad animal y secuestro de carbono en los sistemas de pastoreo. Asimismo, se ha señalado que la mejora en la gestión del alimento animal y la implementación de estrategias nutricionales adecuadas constituyen componentes clave para la sostenibilidad de los sistemas ganaderos (Mamphogoro et al., 2024; McCoard et al., 2020). En este contexto se requiere fortalecer la investigación orientada a la cuantificación rigurosa de estos beneficios en condiciones de campo, el desarrollo de metodologías de monitoreo accesibles y el diseño de incentivos monetarios por servicios ecosistémicos que promueva la adopción de prácticas sostenibles por parte de los productores.

CONCLUSIONES

El análisis de la producción científica global sobre forrajes y sistemas ganaderos sostenibles durante el periodo 2015 - 2025 evidenció un incremento sostenido en el número de publicaciones, con una

participación destacada de países como China, Brasil, Colombia y Estados Unidos, reflejando el creciente interés por el desarrollo de sistemas ganaderos más sostenibles a nivel mundial.

La red de colaboración científica presentó una estructura multipolar, en la que la interacción entre países con diferentes niveles de desarrollo favorece la generación de conocimiento aplicable a diversos contextos agroecológicos, destacando la cooperación internacional como un elemento clave en el avance del campo.

En cuanto a las tendencias temáticas, se identificó una transición desde estudios centrados en la caracterización de los forrajes hacia enfoques orientados a la sostenibilidad, en los que la eficiencia en el uso de recursos, la mitigación del cambio climático y el bienestar animal se consolidan como ejes prioritarios de investigación. Asimismo, la literatura revisada destaca la diversificación de especies forrajeras, el uso de leguminosas, gramíneas, especies no convencio-

nales y la implementación de sistemas silvopastoriles como estrategias que contribuyen a mejorar la productividad y a reducir el impacto ambiental de los sistemas ganaderos.

No obstante, se evidenció una limitada disponibilidad de estudios de largo plazo que evalúen la sostenibilidad integral de estos sistemas, así como una escasa incorporación de variables socioeconómicas en su análisis.

En este contexto, se recomienda que futuras investigaciones desarrollen estudios integrales de largo plazo que incluyan variables productivas, ambientales y económicas, así como enfoques interdisciplinarios que incorporen la dimensión social, con el fin de mejorar la adopción y sostenibilidad de las estrategias forrajeras en los sistemas ganaderos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adar, S., Paz-Kagan, T., Argaman, E., Dubinin, M., & Sternberg, M. (2024). Identifying climatic drivers of forage quantity and quality in Mediterranean rangelands using remote sensing. *Science of the Total Environment*, 957, 177797. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177797>
- Adeniji, Y. A., Bomberger, R., Goodall, S. R., Hristov, A. N., Stefanoni, H. A., & Harvatine, K. J. (2025). Effect of increasing dietary fat by feeding 15% whole cottonseed on milk production, total-tract digestibility, and methane emission in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 108(3), 2393–2406. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25378>
- Allen, V. G., Batello, C., Berretta, E. J., Hodgson, J., Kothmann, M., Li, X., Mclvor, J., Milne, J., Morris, C., Peeters, A., & Sanderson, M. (2011). An international terminology for grazing lands and grazing animals. *Grass and Forage Science*, 66(1), 2–28. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2010.00780.x>
- Ammar, H., Kholif, A. E., Horst, E. H., Marti, M. E. H., Teixeira, I. A. M. A., Hlel, N., Morsy, T. A., Fahmy, M., Gouda, G. A., Mateos, I., López, S., & Chahine, M. (2024). Chemical composition and in vitro rumen fermentation kinetics of leaves and stems of *Moringa oleifera* and *Leucaena leucocephala* as potential feedstuffs for sheep. *Cogent Food and Agriculture*, 10(1), 2405881. <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2405881>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Carvajal-Tapia, J. I., Morales-Velasco, S., Villegas, D. M., Arango, J., & Vivas-Quila, N. J. (2021). Biological nitrification inhibition and forage productivity of *Megathyrus maximus* in Colombian dry tropics. *Plant, Soil and Environment*, 67(5), 270–277. <https://doi.org/10.17221/445/2020-PSE>
- Cheng, M., McCarl, B., & Fei, C. (2022). Climate Change and Livestock Production: A Literature Review. *Atmosphere*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/atmos13010140>
- Chojnacka, K., Mikula, K., Izydorczyk, G., Skrzypczak, D., Witek-Krowiak, A., Gersz, A., Moustakas, K., Iwaniuk, J., Grzędzicki, M., & Korczyński, M. (2021). Innovative high digestibility protein feed materials reducing environmental impact through improved nitrogen-use efficiency in sustainable agriculture. *Journal of Environmental Management*, 291, 112693. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112693>
- Cooke, A. S., Machezano, H., Ventura-Cordero, J., Louro-Lopez, A., Joseph, V., Gwiriri, L. C., Takahashi, T., Morgan, E. R., Lee, M. R. F., & Nyamukondiwa, C. (2024). Opportunities to improve goat production and food security in Botswana through forage nutrition and the use of supplemental feeds. *Food Security*, 16(3), 607–622. <https://doi.org/10.1007/s12571-024-01452-1>
- De Vega, J. J., Ayling, S., Hegarty, M., Kudrna, D., Goicoechea, J. L., Ergon, A., Rognli, O. A., Jones, C., Swain, M., Geurts, R., Lang, C., Mayer, K. F. X., Rössner, S., Yates, S., Webb, K. J., Donnison, I. S., Oldroyd, G. E. D., Wing, R. A., Caccamo, M., ... Sköt, L. (2015). Red clover (*Trifolium pratense* L.) draft genome provides a platform for trait improvement. *Scientific Reports*, 5, 17394. <https://doi.org/10.1038/srep17394>
- de Paula, M. F. F. V., Marques, R. S., Pires, A. V., Soares, L. C. B., Limele, A. C., Ferreira, E. M., & Polizel, D. M. (2024). Effect of forage quality and narasin inclusion on ruminal fermentation, nutrient intake, and total tract digestibility of Nellore steers. *Translational Animal Science*, 8, txae107. <https://doi.org/10.1093/tas/txae107>
- Della Rosa, M. M., Sandoval, E., Luo, D., Pacheco, D., & Jonker, A. (2022). Effect of feeding fresh forage plantain (*Plantago lanceolata*) or ryegrass-based pasture on methane emissions, total-tract digestibility, and rumen fermentation of nonlactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 105(8), 6628–6638. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21757>
- Detmann, E., Sousa, L. C. O., Lima, N. S. A., & Franco, M. O. (2024). What is the impact of neutral detergent fibre digestibility on productive performance of beef cattle fed tropical forages? *Livestock Science*, 290, 105608. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2024.105608>
- Eeswaran, R., Nejadhashemi, A. P., Faye, A., Min, D., Prasad, P. V. V., & Ciampitti, I. A. (2022). Current and Future Challenges and Opportunities for Livestock Farming in West Africa: Perspectives from the Case of Senegal. *Agronomy*, 12, 8. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081818>
- Epifanio, P. S., Costa, K. A. P., Severiano, E. C., Souza, W. F., Teixeira, D. A. A., Silva, J. T., & Aquino, M. D. M. (2019). Productive and nutritional characteristics of *Brachiaria brizantha* cultivars intercropped with *Stylosanthes* cv. Campo Grande in different forage systems. *Crop and Pasture Science*, 70(8), 718–729. <https://doi.org/10.1071/CP18447>
- Espitia Buitrago, P. A., Hernández, L. M., Burkart, S., Palmer, N., & Cardoso Arango, J. A. (2021). Forage-fed insects as food and feed source: Opportunities and constraints of edible insects in the tropics. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 724628. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.724628>
- Eugène, M., Klumpp, K., & Sauviant, D. (2021). Methane mitigating options with forages fed to ruminants. *Grass and Forage Science*, 76(2), 196–204. <https://doi.org/10.1111/gfs.12540>
- FAO. (2022). Producción animal. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/animal-production/en/>
- FAO. (2025). Datos clave | Sistemas pecuarios. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/livestock-systems/resources/key-facts/es/>
- Fenetahun, Y., You, Y., Fentahun, T., Xinwen, X., & Yong-Dong, W. (2021). Effects of grazing intensity on forage nutritive value of dominant grass species in Borana rangelands of Southern Ethiopia. *PeerJ*, 9, e12204. <https://doi.org/10.7717/peerj.12204>
- Fiorelli, A. B., Ziech, M. F., Fluck, A. C., Gerei, J. C., Col, D., Berns, L., Hoffmann, F., & Costa, O. A. D. (2018). Nutritive value of grasses of genus *Cynodon* mixed with forage peanut. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 70(6), 1970–1978. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-10048>
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S.,

- Tilman, D., & Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Ghalkhani, A., Golzardi, F., Khazaei, A., Mahrok, A., Illés, Á., Bojtor, C., Mousavi, S. M. N., & Széles, A. (2023). Irrigation management strategies to enhance forage yield, feed value, and water-use efficiency of sorghum cultivars. *Plants*, 12(11), 2154. <https://doi.org/10.3390/plants12112154>
- Gil, J. D. B., Garrett, R. D., Rotz, A., Daioglou, V., Valentim, J., Pires, G. F., Costa, M. H., Lopes, L., & Reis, J. C. (2018). Tradeoffs in the quest for climate smart agricultural intensification in Mato Grosso, Brazil. *Environmental Research Letters*, 13(6), 064021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac4d1>
- Binwal, D. S., Kumar, R., Ram, H., Dutta, S., Arjun, M., & Hindoriya, P. S. (2019). Fodder productivity and profitability of different maize and legume intercropping systems. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 89(9), 1451–1455. <https://doi.org/10.56093/ijas.v89i9.93486>
- Gilson, G., Colombini, S., Borreani, G., Croveto, G. M., Sandrucci, A., Galassi, G., Tabacco, E., & Rapetti, L. (2020). Milk production, methane emissions, nitrogen, and energy balance of cows fed diets based on different forage systems. *Journal of Dairy Science*, 103(9), 8048–8061. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-18134>
- Grassmann, C. S., Mariano, E., Rocha, K. F., Gilli, B. R., & Rosolem, C. A. (2020). Effect of tropical grass and nitrogen fertilization on nitrous oxide, methane, and ammonia emissions of maize-based rotation systems. *Atmospheric Environment*, 234, 117571. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117571>
- Gutiérrez-Guzmán, U. N., Ríos-Vega, M. E., Núñez-Hernández, G., Esquivel-Romo, A., Vázquez-Navarro, J. M., & Anaya-Salgado, A. (2022). Producción de maíz forrajero con dos sistemas de riego y tres niveles de la evaporación aplicada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(28), 3281. <https://doi.org/10.29312/remexa.v13i28.3281>
- Harun, N., Chaudhry, A. S., Shaheen, S., Ullah, K., & Khan, F. (2017). Ethnobotanical studies of fodder grass resources for ruminant animals, based on the traditional knowledge of indigenous communities in Central Punjab Pakistan. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 13(1), 184. <https://doi.org/10.1186/s13002-017-0184-5>
- Harrison, M. T., McSweeney, C., Tomkins, N. W., & Eckard, R. J. (2015). Improving greenhouse gas emissions intensities of subtropical and tropical beef farming systems using *Leucaena leucocephala*. *Agricultural Systems*, 136, 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.03.003>
- Hatfield, J. L., & Dold, C. (2019). Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science*, 10, 103. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>
- Hernández-Arboleda, X., Ortiz-Grisales, S., Vivas-Arturo, W. F., Fernández-Romay, Y., La O-León, O., Pérez-Márquez, S., Luiz-Abdalla, A., & Ledea-Rodríguez, J. L. (2024). Nutritional value and in vitro dry matter degradability in Mexican sunflower: *Tithonia diversifolia* Helms (Gray). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 27(3), 5211. <https://doi.org/10.56369/tsaes.5211>
- Hristov, A. N. (2023). Perspective: Could dairy cow nutrition meaningfully reduce the carbon footprint of milk production? *Journal of Dairy Science*, 106(11), 7336–7340. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23461>
- Kang, J., Ding, R., Chen, J., Wu, S., Gao, W., Wen, Z., Tong, L., & Du, T. (2025). Crop root system phenotyping with high water-use efficiency and its targeted precision regulation: Present and prospect. *Agricultural Water Management*, 309, 109327. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109327>
- Khan, K., Khan, S., Ullah, S., Khan, N. A., Khan, I., & Ahmad, N. (2017). Nutritive value, fiber digestibility and methane production potential of tropical forages in rabbits: Effect of species and harvest maturity. *The Journal of Animal and Plant Sciences*, 27(4), 1101–1109.
- Kotowski, M., Kotowska, D., Biró, M., Babai, D., Sharifian, A., Szentés, S., Łuczaj, Ł., & Molnár, Z. (2023). Change in European forage and fodder plant indicator sets over the past 250 years. *Rangeland Ecology and Management*, 88, 159–173. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2023.02.010>
- Lemaire, G., Franzluebbers, A., Carvalho, P. C. de F., & Dedieu, B. (2014). Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 190, 4–8. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>
- Madaki, M. Y., Barnabas, B., Shehu, A., Ullah, A., & Bavorova, M. (2025). Institutional services towards climate action: A case of climate change adaptation of agro-pastoralists in the drylands of Nigeria. *Climate Policy*, 25(8), 1222–1236. <https://doi.org/10.1080/14693062.2024.2447487>
- Maduro Dias, C. S. A. M., Nunes, H., Vouzela, C., Madruga, J., & Borba, A. (2023). In vitro rumen fermentation kinetics determination and nutritional evaluation of several non-conventional plants with potential for ruminant feeding. *Fermentation*, 9(5), 416. <https://doi.org/10.3390/fermentation9050416>
- Mamphogoro, T. P., Mpanza, T. D. E., & Mani, S. (2024). Animal feed production and its contribution to sustainability of livestock systems: African perspective. En A. D. Nciizah, A. Roonnarain, B. Ndaba, & M. E. Malobane (Eds.), *The marginal soils of Africa: Rethinking uses, management and reclamation* (pp. 37–54). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55185-7_3
- McCoard, S. A., Stevens, D. R., & Whitney, T. R. (2020). Sustainable sheep and goat production through strategic nutritional management and advanced technologies. En S. A. McCoard (Ed.), *Animal agriculture: Sustainability, challenges and innovations* (pp. 231–246). Chap. 13. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817052-6.00013-6>
- Mesquita Da Silva, G., Da Silva, F. F., Viana, P. T., Santana, E., Rodrigues, O., Charles, Moreira, N., Meneses, A., De Souza, J., Júnior, A. C., Rufino, A. L., & Barreto, S. (2016). Avaliação de forrageiras tropicais: Revisão. *PubVet*, 10(11), 1–15.
- Montazar, A., & Afshar, R. K. (2025). Climate-smart water technologies and strategies for a resilient forage production system. *Advances in Agronomy*, 191, 1–45. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2025.01.001>
- Morocho, G. A., Toalombo, P. A., Guevara, H. P., & Jiménez, S. F. (2023). Assessing the potential and nutritional composition of the hybrid grass Cuba OM-22 (*Pennisetum purpureum* Schumacher × *Pennisetum glaucum* L.) at three cutting ages. *Archivos de Zootecnia*, 72(278), 128–142. <https://doi.org/10.21071/az.v72i278.5716>
- Mwangi, P. M., Eckard, R., Gluecks, I., Merbold, L., Mulat, D. G., Gakige, J., Marquardt, S., & Pinares-Patino, C. S. (2024). Supplementation of a tropical low-quality forage with *Calliandra calothyrsus* improves sheep health and performance, and reduces methane emission. *Frontiers in Animal Science*, 5, 1296203. <https://doi.org/10.3389/fanim.2024.1296203>
- Nations, U. (2019). World Population Prospects 2019: Highlights. Statistical Papers - United Nations (Ser. A), Population and Vital Statistics Report. <https://doi.org/10.18356/13bf5476-en>
- Nunes, H. P. B., Teixeira, S., Maduro Dias, C. S. A. M., & Borba, A. E. S. (2022). Alternative forages as roughage for ruminant: Nutritional characteristics and digestibility of six exotic plants in Azores Archipelago. *Animals*, 12(24), 3587. <https://doi.org/10.3390/ani12243587>
- Paciullo, D. S. C., Pires, M. F. A., Müller, M. D., & Maurício, R. M. (2024). Silvopastoral systems as an alternative of dairy cattle production in tropical pastures. En D. S. C. Paciullo (Ed.), *Silvopastoral systems of Meso America and Northern South America* (pp. 105–115). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43063-3_6
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *The BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pasquini Neto, R., Furtado, A. J., Silva, G. V., Lobo, A. A. G., Abdalla Filho, A. L., Brunetti, H. B., Bosi, C., Pedrosa, A. D. F., Pezzopane, J. R. M. E., Oliveira, P. P. A., & Rodrigues, P. H. M. (2024). Forage accumulation and nutritive value in extensive, intensive, and integrated pasture-based beef cattle production systems. *Crop and Pasture Science*, 75(5), CP24043. <https://doi.org/10.1071/CP24043>
- Pérez-Reverón, R., Perdomo-González, A., de la Roza-Delgado, B., Rodríguez, C., Pérez-Pérez, J. A., & Díaz-Peña, F. J. (2024). Extending beyond traditional forage: potential nutritional benefits of native plants in extreme arid insular regions. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1476809>
- Peters, M., Herrero, M., Fisher, M., Erb, K.-H., Rao, I., Subbarao, G. V., Castro, A., Arango, J., Chará, J., Murgueitio, E., Van Der Hoek, R., Läderach, P., Hyman, G., Tapasco, J., Strassburg, B., Paul, B., Rincón, A., Schultze-Kraft, R., Fonte, S., & Searchinger, T. (2013). Challenges and opportunities for improving eco-efficiency of tropical forage-based systems to mitigate greenhouse gas emissions. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 1, 68–75. [https://doi.org/10.17138/tgft\(1\)156-167](https://doi.org/10.17138/tgft(1)156-167)

- Place, S. E. (2024). Environmental sustainability of livestock systems. *Meat and Muscle Biology*, 8(1), 18117. <https://doi.org/10.22175/mmb.18117>
- R Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing (Versión 4.3.1). R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ribeiro, R. E. P., Mello, A. C. L., Cunha, M. V., Santos, M. V. F., Costa, S. B. M., Coelho, J. J., Carvalho, R. O., & Silva, V. J. (2023). Water use efficiency and yield responses of *Cenchrus purpureus* genotypes under irrigation. *The Journal of Agricultural Science*, 161(4), 572–580. <https://doi.org/10.1017/S0021859623000461>
- SCImago Research Group. (2023). Scimago Graphica (Versión 1.0). <https://www.scimagoilab.com/tools/graphica/>
- Shit, N. (2019). Hydroponic fodder production: An alternative technology for sustainable livestock production in India. *Exploratory Animal and Medical Research*, 9(2), 168–172.
- Shri Rangasami, S. R., Purnima, M., Pushpam, R., Ajaykumar, R., Thirunavukkarasu, M., Sathiyaraj, K., Rajanbabu, V., & Yazhini, G. (2024). Enhancing animal nutritional security through biofortification in forage crops: A comprehensive review. *Indian Journal of Animal Research*, 58(11), 1838–1845. <https://doi.org/10.18805/IJAR.B-5466>
- Sosa-Montes, E., Sánchez-Sánchez, Z. S., Mendoza-Pedroza, S. I., Ramírez-Bribiesca, E., González-Cerón, F., & Huerta, H. V. (2022). Chemical composition of four forage grasses from the state of Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(7), 1315–1322. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i7.3333>
- Sow, S., Ranjan, S., Kumar, N., Gitari, H., Dayal, P., & Kumar, S. (2024). Sustainable fodder production in South Asia through silvopastoral systems. *Current Science*, 126(10), 126.
- Tamara, Y. B., Salgado, K. P., Tavera-Quiroz, M. J., & Mendoza, J. G. S. (2025). Characterization of the flours derived from the aerial part of two varieties of cassava and their potential use as animal feed. *Ciencia Tecnología Agropecuaria*, 26(1), 3608. https://doi.org/10.21930/rcta.vol26_num1_art:3608
- Tahir, M. N., Ihsan, M. Z., Siddiqui, M. H., Ul Haque, M. N., Zahra, N., Chattha, W. S., & Bajwa, A. A. (2024). Appraisal of spatial distribution and fibre degradability of cereal–legume fodders to enhance the sustainability of livestock feed supply in subtropics. *Sustainability*, 16(10), 4070. <https://doi.org/10.3390/su16104070>
- Tassone, S., Barbera, S., Issaoui, R., Kaihara, H., Glorio Patrucco, S., & Abid, K. (2025). In Vitro Assessment of the Nutritional Value of Seed Crop Plants Damaged by Hailstorms and Strong Winds as Alternative Forages for Ruminants. *Agriculture*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/agriculture15080799>
- Toledo, A. F., Silva, A. P., Barbosa, F. V. L., Barboza, R. D. F., Oliveira, I. C. R., Marino, E. D., Polizel, D. M., & Bittar, C. M. M. (2024). Forage sources in total mixed rations on rumen fermentation, gut fill, and development of the gastrointestinal tract of dairy calves. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80271-y>
- Tulu, A., Diribsa, M., Gadisa, B., & Temesgen, W. (2025). Stover yield, morphological fractions and nutrient composition of five stay-green sorghum (*Sorghum bicolor* L.) varieties at the physiological maturity stage. *Heliyon*, 11(1), e41753. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41753>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2024). VOSviewer manual (Versión 1.6.20). Universiteit Leiden. https://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.20.pdf
- Vargas, J. J., Pabón, M. L., & Carulla, J. E. (2023). Methane emissions from rams fed kikuyu hay or kikuyu-lotus hay mixture. *Archivos de Zootecnia*, 72(278), 92–98. <https://doi.org/10.21071/az.v72i278.5711>
- Vieira Junior, N. A., Evers, J., Vianna, M. S., Pedreira, B. C. E., Pezzopane, J. R. M., & Marin, F. R. (2022). Understanding the arrangement of Eucalyptus-Marandu palisade grass silvopastoral systems in Brazil. *Agricultural Systems*, 196, 103316. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103316>
- Wang, T., Wang, B., Xiao, A., & Lan, J. (2024). Optimizing seeding ratio for legume forage to maximize system productivity and resource use efficiency in mixed cropping systems. *Agriculture*, 14(8), 1249. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081249>
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L. J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J. A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., ... Murray, C. J. L. (2019). Food in the Anthropocene: The EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)
- Wróbel, B., Zielewicz, W., & Paszkiewicz-Jasińska, A. (2025). Improving forage quality from permanent grasslands to enhance ruminant productivity. *Agriculture*, 15(13), 1438. <https://doi.org/10.3390/agriculture15131438>
- Ye, Z. P., He, J. Q., An, T., Duan, S. H., Kang, H. J., & Wang, F. B. (2024). Influences of residual stomatal conductance on the intrinsic water use efficiency of two C3 and two C4 species. *Agricultural Water Management*, 306, 109136. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109136>