

TENDENCIAS CIENTÍFICAS Y AVANCES EN LA INVESTIGACIÓN DE FORRAJES PARA SISTEMAS GANADEROS SOSTENIBLES: ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO Y REVISIÓN DE LA LITERATURA

SCIENTIFIC TRENDS AND ADVANCES IN FORAGE RESEARCH FOR SUSTAINABLE LIVESTOCK SYSTEMS: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS AND LITERATURE REVIEW

Lizbeth Gissele Zevallos-Ochoa ^{1*}

¹ Doctorado en Ciencias Agropecuarias, Escuela de Posgrado, Universidad Nacional de Trujillo, Perú
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4735-0027>. Correo: izevalloso@unitru.edu.pe

Rodrigo Ernesto Salazar-López²

² Facultad de Recursos Renovables, Escuela de Ingeniería Agronómica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6194-1638>. Correo: rodrigo.salazar@epoch.edu.ec

Marco Rojas-Paredes³

³ Universidad Nacional Agraria de la Selva, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3570-6885>. Correo: marco.rojas@unas.edu.pe

Iván González-Puetate⁴

⁴ Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad de Guayaquil; Fauna, Conservation and Global Health Research Group, Universidad Regional Amazónica Ikiam; Doctorante en Ciencias Agropecuarias, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9930-0617>. Correo: ivan.gonzalezp@ug.edu.ec

* Autor para correspondencia: izevalloso@unitru.edu.pe

Resumen

Las investigaciones sobre forrajes han experimentado un crecimiento sostenido en respuesta a la necesidad de sistemas pecuarios más sostenibles; en este contexto, el presente estudio analizó las tendencias globales mediante un enfoque bibliométrico de literatura indexada en Scopus (2015–2025), mediante una búsqueda

sistemática en título, resumen y palabras clave sobre sostenibilidad, nutrición, forrajes y producción pecuaria; se seleccionaron 86 artículos originales en inglés tras criterios de inclusión y exclusión, cuyos datos fueron procesados con VOSviewer, Scimago Graphica y Bibliometrix en R, lo que permitió evaluar redes de coautoría, mapas de colaboración internacional, co-ocurrencia de palabras clave y evolución temática; en consecuencia, los resultados evidencian un incremento significativo en la producción científica, así como una mayor interacción entre países desarrollados y emergentes, además de una diversificación en las líneas de investigación que abarcan la mejora genética de forrajes, la eficiencia nutricional, la mitigación de emisiones y la sostenibilidad de los sistemas productivos. En conjunto, la investigación en forrajes configura un campo dinámico y en expansión, con perspectivas orientadas a la integración de tecnologías avanzadas para optimizar la producción y reducir el impacto ambiental en la producción animal.

Palabras clave: Forraje; sostenibilidad; valor nutricional; sistema silvopastoril; análisis bibliométrico

Abstract

Research on forages has experienced sustained growth in response to the need for more sustainable livestock production systems; in this context, the present study analyzed global trends using a bibliometric approach based on literature indexed in Scopus (2015–2025), through a systematic search in titles, abstracts, and keywords related to sustainability, nutrition, forages, and livestock production. A total of 86 original articles in English were selected following inclusion and exclusion criteria, and their data were processed using VOSviewer, Scimago Graphica, and Bibliometrix in R, enabling the evaluation of co-authorship networks, international collaboration maps, keyword co-occurrence, and thematic evolution. Consequently, the results revealed a significant increase in scientific production, as well as greater interaction between developed and emerging countries, along with a diversification of research lines encompassing forage genetic improvement, nutritional efficiency, emission mitigation, and the sustainability of production systems. Overall, forage research represents a dynamic and expanding field, with future perspectives focused on the integration of advanced technologies to optimize production and reduce environmental impact in animal production systems.

Keywords: Bibliometric analysis; forage; nutritional value; silvopastoral system; sustainability

Fecha de recibido: 12/01/2025

Fecha de aceptado: 23/03/2026

Fecha de publicado: 05/04/2026

Introducción

La ganadería constituye cerca del 40 % del sector agrícola total en los países desarrollados y el 20 % en los países en desarrollo, apoyando el sustento de al menos 1.300 millones de personas y aporta el 34 % de

proteínas de origen animal nivel mundial (FAO, 2022), este sector de gran importancia a nivel global se caracteriza por una población estimada de 1.500 millones de vacunos, con más de 1.200 millones de ovinos y mil millones de caprinos (FAO, 2025).

Sin embargo, el crecimiento de la producción ganadera enfrenta un desafío significativo debido a la disponibilidad limitada de forrajes de alta calidad, especialmente en áreas con acceso restringido a fuentes hídricas y pastos de calidad (Eeswaran et al., 2022). Diversos factores como la degradación de pastizales, la variabilidad climática y la intensificación de la agricultura han reducido la oferta de estos recursos esenciales (Madaki et al., 2025). Asimismo, la erosión del suelo inducida por el viento, la escasez de insumos forrajeros y los efectos adversos de fenómenos meteorológicos extremos, como olas de calor prolongadas, han comprometido la biomasa y el valor nutricional del forraje (Adar et al., 2024; Cheng et al., 2022; Wang et al., 2024).

Los forrajes están compuestos principalmente por gramíneas y leguminosas, que son la fuente de alimentación más rentable para la producción ganadera rumiante, constituyendo el pilar nutricional de su dieta, proporcionando los nutrientes esenciales (Fibra, proteínas, vitaminas y minerales) a través de la ingesta de materia seca (MS) (Mesquita Da Silva et al., 2016) y se estima que el ganado consume aproximadamente 6 000 millones de toneladas de MS al año, de las cuales alrededor de la mitad son pastos (FAO, 2022). En respuesta a estos desafíos, la implementación de sistemas de producción de forraje representa una estrategia clave para reducir los costos de alimentación y favorecer la sostenibilidad de la producción ganadera (Ginwal et al., 2019).

En este contexto, centros de investigación en Etiopía han evaluado diversos genotipos de sorgo, lo que ha permitido la selección y el registro variedades con alto potencial forrajero, entre ellas, se destacan aquellas que conservan su biomasa durante la cosecha de granos, representando una alternativa prometedora para la alimentación animal (Tulu et al., 2025).

Este artículo de revisión tiene como objetivo examinar las tendencias globales en la investigación de forrajes y la colaboración científica en este ámbito. Se examinan estrategias innovadoras que mejoren la producción forrajera para garantizar una alimentación adecuada al ganado rumiante y contribuir en la sostenibilidad de la producción ganadera.

Materiales y métodos

Se realizó una búsqueda sistemática de literatura científica publicada en inglés entre 2015 y 2025 a nivel global, con el fin de cumplir el objetivo del estudio. Inicialmente, se exploraron artículos científicos originales en la base de datos Scopus el 22 de febrero de 2025, utilizando los términos “sustainable”, “nutritional”, “forages” y “livestock” en título, resumen y palabras clave. Como resultado, se recuperaron 124 artículos, de los cuales se seleccionaron 86 artículos originales en inglés tras aplicar criterios de inclusión y exclusión. Posteriormente, los datos bibliográficos (información de citación, información bibliográfica, resumen y palabras clave, financiamiento y otros datos) fueron exportados a Excel para su análisis, tal como se presenta en la Figura 1.

Adicionalmente, se realizaron búsquedas específicas en Scopus considerando la especie animal, empleando los mismos campos de búsqueda. Para caprinos, se utilizaron los términos “sustainable”, “nutritional”, “forages”, “livestock” OR “goat”, excluyendo “bovine”, “sheep”, “bos”, “cow” y “dairy cattle”. Para bovinos, se emplearon los términos “sustainable”, “nutritional”, “forages”, “livestock” OR “bovine”, excluyendo “goat” y “sheep”. Para ovinos, se utilizaron los términos “sustainable”, “nutritional”, “forages”, “livestock” OR “ovine”, excluyendo “goat”, “bos”, “bovine”, “cow” y “dairy cattle”.

Búsqueda de la literatura publicada

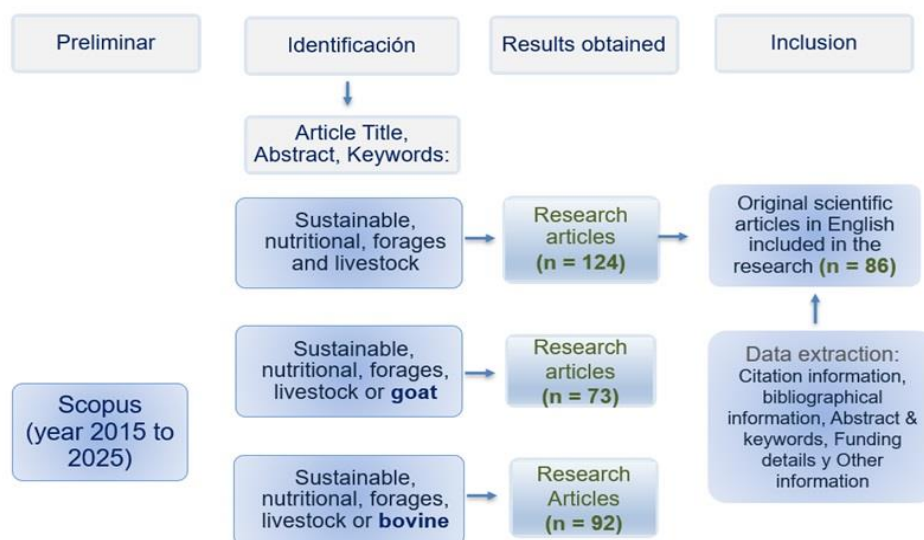


Figura 1. Secuencia de búsqueda y números de documentos de investigación publicadas en inglés (2015-2025).

Procesamiento de datos.

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.

Mapa geográfico de colaboración entre países

Para generar el mapa de colaboración internacional en Scimago Graphica, se siguió un procedimiento estructurado que incluyó la recopilación y procesamiento de datos. El primer paso consistió en obtener los datos del archivo generada por la herramienta VOSviewer en formato GML, que contiene las publicaciones científicas y redes de coautoría de bases de datos de Scopus de 86 artículos científicos originales que fueron seleccionadas. El segundo paso fue la importación de datos en Scimago Graphica, para ello, 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.

Análisis coocurrencia de palabras claves.

Para generar la visualización de redes de co-ocurrencia de palabras clave en Scimago Graphica, se siguió un procedimiento sistemático que involucró la extracción y procesamiento. El primer paso consistió en utilizar como base el formato en GML del análisis de redes de coautoría que se realizó en VOSviewer, que contiene los registros de 86 artículos originales en inglés que fueron seleccionados en la búsqueda. Posteriormente, se estructuró los datos en grupo con palabras claves similares para mejorar la coherencia del análisis, con esta información se generó una matriz, la cual reflejaba la frecuencia con la que ciertos términos aparecían juntos en las publicaciones científicas.

Una vez preparada la matriz de datos, se ingresó a Scimago Graphica y se creó un nuevo proyecto, se importó el archivo, asegurándose de que los nodulos (correspondientes a las palabras clave) y los enlaces (que representaban la relación entre ellas) estuvieran correctamente estructurados, luego, se seleccionó la opción de visualización de redes, permitiendo la representación gráfica de las conexiones entre los términos más frecuentes.

El siguiente paso consistió en configurar la visualización de las palabras, se ajustó el tamaño de los nodulos en función de la frecuencia de aparición de cada palabra clave en la base de datos, lo que permitió resaltar los conceptos más relevantes en la literatura científica, además, se trazaron las conexiones entre términos con base en su nivel de co-ocurrencia, evidenciando las relaciones más fuertes dentro del corpus analizado, también se implementó una codificación de colores, agrupando las palabras clave en distintos clústeres temáticos que reflejaban áreas de investigación relacionadas.

Evolución temática de la investigación científica

Para analizar la evolución temática de la investigación científica en la última década mediante Bibliometrix, se siguieron varios pasos estructurados. En primer lugar, se realizó la recopilación de datos bibliográficos a partir de la base de datos de Scopus, los 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:

```
##### Script para el uso de la herramienta bibliometrix #####
```

```
library(bibliometrix)
```

```
biblioshiny()
```

Este procedimiento generó la apertura del biblioshiny para el análisis, importando el archivo de los documentos seleccionados en Excel formato CSV de Scopus, analizando 86 documentos, luego la opción Overview, donde se observó la información del marco temporal, fue del 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 para identificar 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

Análisis de redes de coautoría entre países en la investigación

El análisis de redes de coautoría permitió identificar los principales patrones de colaboración científica internacional en la investigación relacionada con los forrajes, para la construcción de la red se estableció como criterio la inclusión de países con un mínimo de cuatro publicaciones científicas, lo que permitió identificar diez países con mayor participación en esta área de estudio.

El mapa geográfico de citas presentado en la figura 2 muestra las interacciones entre países en función de sus citas y colaboraciones académicas, en esta representación los nodos corresponden a los países y los enlaces reflejan la intensidad de las relaciones de coautoría o citación entre ellos. Los resultados evidencian una amplia red de colaboración entre países de América, Europa, Asia y África, lo que sugiere que la investigación en sistemas forrajeros se desarrolla cada vez más en un contexto científico globalizado. El análisis de la red reveló que China, Colombia, Brasil y Estados Unidos son los países con mayor número de colaboraciones científicas en la temática analizada. Además, los países como China y Etiopía existen presencia de colaboraciones que cruzan continentes, lo cual es común en áreas como la ciencia del desarrollo y proyectos agrícolas sostenibles, donde se busca integrar conocimiento de diferentes regiones, también se observa fuertes vínculos de coautoría entre Colombia con Estados Unidos y Brasil con Estados Unidos, lo que indica una cooperación regional y transcontinental significativa, desempeñando un papel central en la red, actuando como principales centros de conexión entre otros países. También se observa que China (14), Colombia (13) y Brasil (11) son los países con mayor número de producción científica a nivel global, seguido por Estados Unidos (9), España (7) y Reino Unido (6) que destacan por tener una producción relativamente alta, lo que demuestra que sus publicaciones, aunque menos numerosas, tienen un impacto significativo, países como Pakistán (4), Italia (4) y Etiopía (4) presentan un menor número, pero con significativa participación.

Los colores están asignados a los países con colaboración científica, el clúster rojo integra a los países de alto impacto como Estados Unidos y Brasil estos países tienen una relación fuerte, visible en investigaciones agrícolas, ambientales y biotecnológicas, áreas donde ambos países tienen roles prominentes a nivel mundial y Brasil siendo un país clave en la producción agropecuaria encuentra en Estados Unidos un socio estratégico tanto para la innovación tecnológica como para la exportación de conocimiento, dentro de este grupo están los artículos científicos de (Epifanio et al., 2019; Pasquini Neto et al., 2024). En el clúster morado se observa una colaboración notable de artículos científicos entre países del Reino Unido y Asia del Sur, puede estar

relacionado con investigaciones sobre la mejora genética de forrajes y la adaptación de especies forrajeras en climas templados y subtropicales, aquí se incluye uno de los artículos de investigación de Harun et al. (2017) y De Vega et al. (2015). El clúster azul, está conformado por China y Etiopía, aunque estos dos países están geográficamente distantes, la colaboración que tienen es fuerte porque tienen un enfoque en proyectos de desarrollo agrícola, recursos naturales o proyectos sobre sostenibilidad, dado que China tiene una creciente influencia en el apoyo a países africanos en términos de infraestructura y desarrollo rural, aborda el artículo de investigación por Wang et al. (2024). En el análisis del clúster naranja existe una densa red de conexiones entre Colombia y España, tienen un interés compartido en el desarrollo de sistemas silvopastoriles y en la investigación de forrajes adaptados a las condiciones tropicales aquí podemos indicar el artículo científico de Espitia Buitrago et al. (2021), estos países han trabajado en la integración de sistemas agroforestales para mejorar la productividad y sostenibilidad de la ganadería. El clúster amarillo, incluye al país de Italia, este grupo no tiene una colaboración activa entre los otros países, pero menciona temas relacionados en ciencia y tecnología.

Esta colaboración internacional es muy beneficiosa para el avance de la investigación sobre los forrajes porque tienen una participación clave en áreas como la agricultura sostenible, en la investigación tecnológica aplicada.

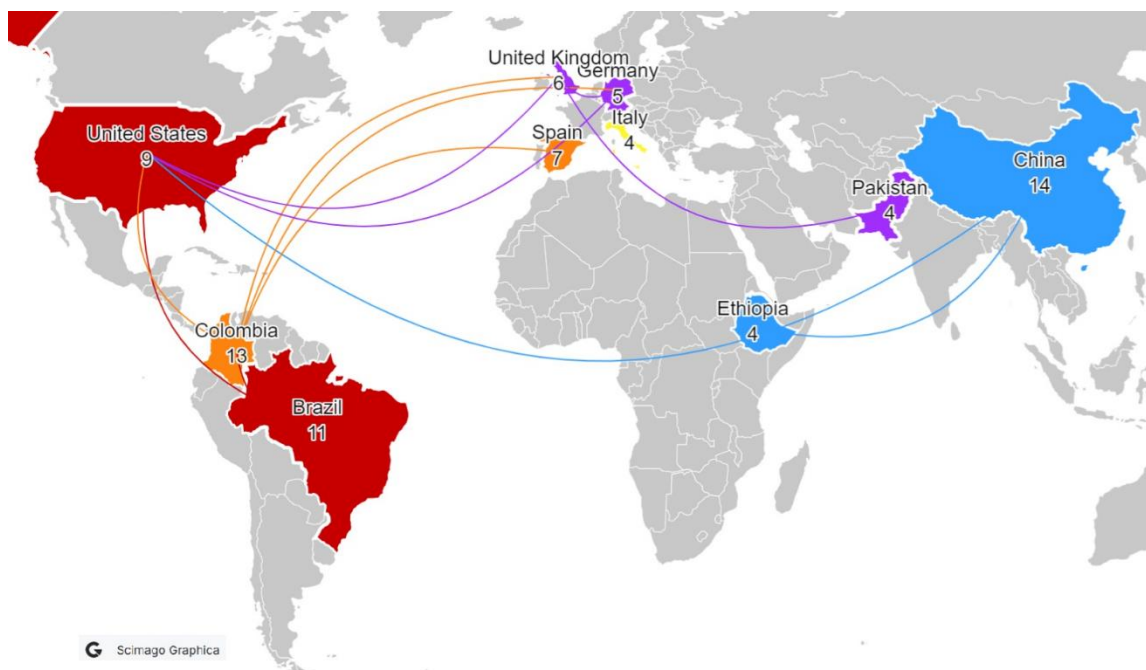


Figura 2. Mapa geográfico de colaboración científica entre países (Obtenido con Scimago Graphica).

Análisis de co-ocurrencia de palabra

El análisis de coocurrencia de palabras claves en la investigación ofrece información valiosa sobre las principales áreas de interés en los últimos años, lo que orienta a los científicos interesados en este campo, del grupo de 86 artículos científicos sobre temas como; sostenibilidad, nutricional, forrajes y ganado, en donde se identificaron un total 41 palabras claves como co-ocurrencia, utilizando la herramienta Scimago grafica, se estableció un umbral para una frecuencia de ocurrencia de palabras, obteniendo como resultado 29 palabras claves que cumplieran este criterio, luego estas palabras clave se clasificaron en 6 grupos distintos como se ilustra en la figura 3.

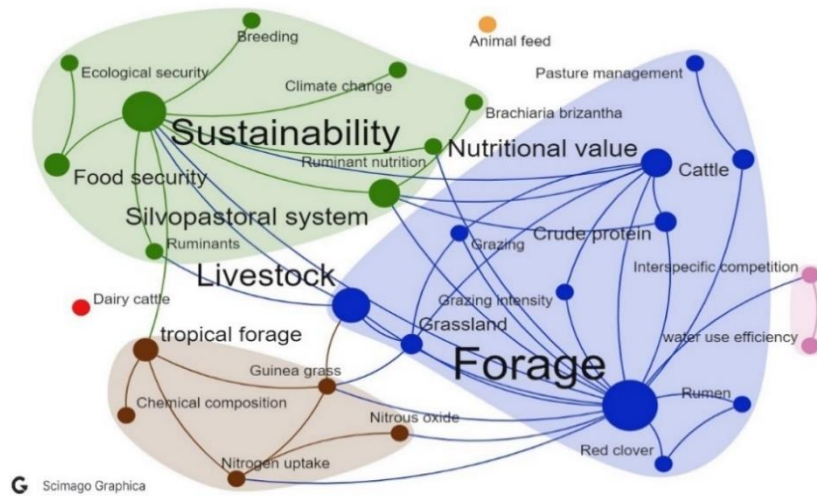


Figura 3. Visualización en red de la co-ocurrencia de palabras clave en investigaciones de la base de datos Scopus (2015-2025).

Esta información es segmentada en 6 clúster de investigación distintas, cada uno de ellos agrupados en términos que están altamente relacionados con el artículo de revisión, los clústeres representan diferentes áreas temáticas en especial con enfoque en la gestión de forrajes, sostenibilidad y ganadería. El primer grupo es el clúster azul que une aspectos como forraje para el ganado y valor nutricional, resalta la importancia de gestionar la carga animal y la presión sobre los pastizales, este aspecto es esencial para evitar la degradación de los recursos forrajeros y promover la regeneración de las pasturas (Zhai et al., 2018), de igual manera la interacción entre diferentes especies forrajeras es fundamental para optimizar mezclas de especies en sistemas agropecuarios, maximizando tanto el rendimiento y como la eficiencia en el uso de recursos.

Según Gaviria-Uribe et al. (2020) concluye que los sistemas basados en leguminosas ofrecen ventajas adicionales en materia seca que se reflejan en mayores ganancias de peso vivo del ganado, por lo que la intensidad de las emisiones de metano (CH₄) generados en sistemas basados en leguminosas fueron menores. Indicando que hace que estos sistemas sean una buena opción para implementar la transición hacia la producción ganadera tropical sostenible. El clúster verde agrupa términos como sostenibilidad, sistema

silvopastoril, nutrición de rumiante y seguridad alimentaria, este clúster está centrado en la relación entre la producción animal y la necesidad de integrar prácticas sostenibles en investigaciones recientes, la sostenibilidad se asocia tanto a la eficiencia en el uso de recursos como a la reducción del impacto ambiental (Azimi et al., 2013; Crotty et al., 2014). En el clúster marrón destaca el término forraje tropical, seguido de guinea grass, composición química, fijación de nitrógeno y óxido nitroso, reflejando el interés en la eficiencia nutricional y la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (Grassmann et al., 2020; Moeinnamini et al., 2024). El clúster morado aborda temas como uso eficiente del agua y competencia interespecífica, estos términos muestran un creciente interés científico en comprender la interacción entre especies forrajeras de gramíneas y leguminosas al influir en la productividad de los pastizales como en la resiliencia de los sistemas ganaderos frente a escenarios de escasez hídrica.

También en la figura 3 podemos observar la tendencia temporal de las palabras clave en donde el tamaño de los círculos indica la frecuencia con la que los términos aparecen en la literatura, reflejando su relevancia en las investigaciones actuales. Los términos como ganado, sostenibilidad y forraje se presentan como los más discutidos, lo que sugiere que la investigación se concentra principalmente en la producción eficiente y sostenible de ganado (Grinnell et al., 2022; Tahir et al., 2024; Uzcátegui-Varela et al., 2022).

Evolución temática de la investigación científica

La figura 4 muestra el análisis de la evolución temática de la investigación científica en la última década (2015-2025), para este análisis se utilizaron los datos electrónicos de Scopus, esta información se procesaron utilizando las herramientas de Bibliometrix en donde se revela un cambio significativo en el enfoque de estudios relacionados con la producción ganadera y el forraje, inicialmente entre los años 2015 y 2018 la investigación se centraba en aspectos básicos como la conservación, el contenido de nitrógeno y el valor nutritivo, posteriormente en los años 2019 a 2022, se observa un desplazamiento hacia temas más específicos como la calidad del forraje, la producción de leguminosas y la fermentación ruminal, proyectando un interés creciente en la optimización de la nutrición animal, en donde investigaciones han destacado la importancia de una dieta equilibrada, incluyendo el uso de forrajes de leguminosas ricos en proteínas y nutrientes esenciales (Shri Rangasami et al., 2024), finalmente las proyecciones para el año 2023 a 2025 indican un enfoque predominante en la sostenibilidad, el cambio climático y el bienestar animal, junto con la evaluación de la eficiencia en la producción ganadera, tal como menciona (Chojnacka et al., 2021 que aumentar la eficiencia en el uso de nutrientes, en particular el nitrógeno, ha sido un objetivo fundamental para reducir las presiones ambientales y mejorar la sostenibilidad de la producción de forrajes.

Esta evolución temática subraya la creciente importancia de abordar los desafíos ambientales y éticos en la producción animal, sin descuidar la mejora continua de la calidad nutricional y la productividad.

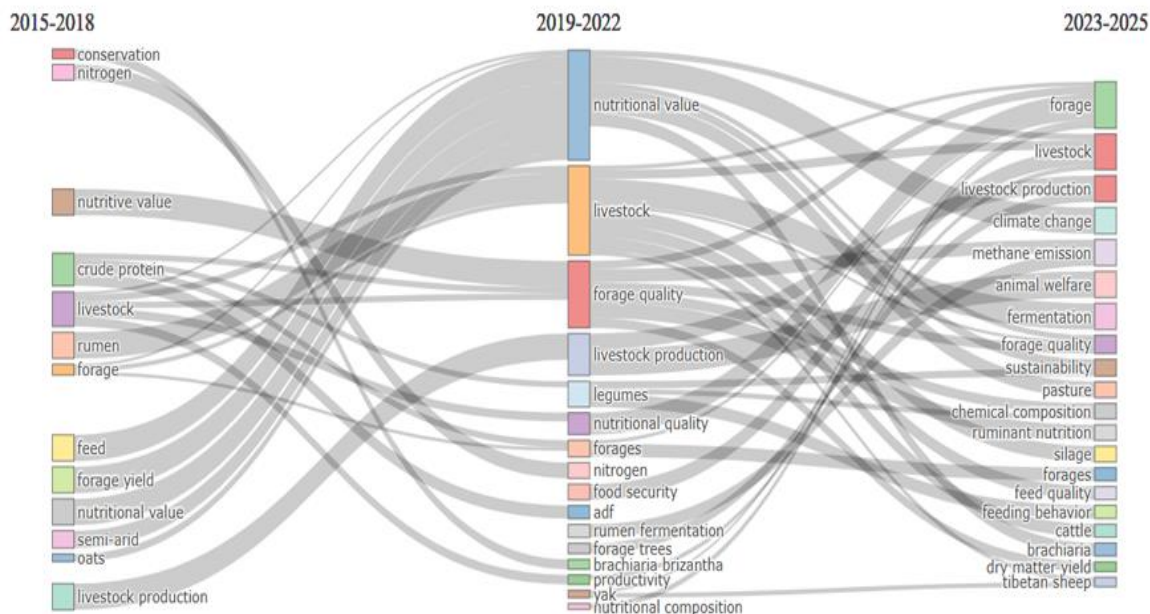


Figura 4. Evolución temática de la investigación científica en la última década de la base de datos Scopus (2015-2025).

Forraje y Sostenibilidad

La conexión entre forraje y sostenibilidad refleja la preocupación por la producción eficiente de forraje, optimizando la calidad nutricional y minimizando el impacto ambiental, las investigaciones que vinculan estos temas suelen centrarse en sistemas de pastoreo sostenibles y la capacidad de captación de nutrientes por parte de especies forrajeras, por lo tanto los cultivos forrajeros pueden considerarse un componente fundamental de la agricultura sostenible (Allen et al., 2011; Lemaire et al., 2014), asimismo forrajes como el cuba OM 22 es una excelente alternativa forrajera para la Región Amazónica, porque presenta un valor nutricional óptimo y las paredes celulares son aceptables

Respecto al impacto ambiental, se reportó que los lípidos y las oleaginosas en la dieta disminuyen la producción de metano (CH₄), pero pueden reducir la fermentación ruminal, la ingesta de alimento y la producción y composición de la leche (Adeniji et al., 2025). Asimismo, se demostró que el ensilado de maíz puede reducir las emisiones de CH₄ en comparación con el ensilado de alfalfa o leguminosas (5-15%) (Gislon et al., 2020). Se exploraron forrajes alternativos como el *Plantago lanceolata* (llantén) y la colza forrajera (*Brassica napus*) por su potencial para disminuir el CH₄, aunque puede comprometer en la digestibilidad. También se investigaron los pastos con alto contenido de azúcar y el pasto genéticamente modificado con alto contenido de grasa para reducir la emisión de CH₄ (Della Rosa et al., 2022; Eugène et al., 2021). La manipulación dietética puede reducir del 10% al 15% en las emisiones de CH₄, mientras que los aditivos alimentarios pueden reducir hasta el 60% en sistemas lecheros intensivos, lo que podría reducir la huella de carbono de la leche entre un 15% y un 26% en el mejor de los casos (Hristov, 2023). La figura 5 muestra el

uso de sistemas de cultivos intercalados en donde combinan las gramíneas con leguminosas empezó a estudiarse en el siglo pasado, por su alta capacidad de fijación biológica de nitrógeno y mejorar las características estructurales del suelo (Epifanio et al., 2019; Fioreli et al., 2018), si existe menores emisiones de gases de efecto invernadero y protección del suelo, por lo tanto reduce la erosión y una mayor resiliencia al clima cambiar (Gil et al., 2018). En los últimos años existe una tendencia por reducir los gases de efecto invernadero para mitigar los efectos adversos del cambio climático, por lo que otra variable a evaluar es la producción de metano (Maduro Días et al., 2023; Nunes et al., 2022).



Figura 5. Beneficios ambientales y productivos de los sistemas de producción de forrajes

Forraje y eficiencia del uso del agua

La figura 5 también destaca la relación entre forraje y la eficiencia en el uso del agua, este aspecto es clave para las regiones con limitaciones hídricas y es un área emergente en la investigación sobre forrajes, especialmente en el contexto del cambio climático. En donde estudios recientes destacan la importancia de tecnologías de riego con enfoque climático inteligente son esenciales para sistemas forrajeros resilientes, estacado la necesidad de fomentar los métodos de riego eficientes y garantizar la sostenibilidad de estos sistemas (Ghalkhani et al., 2023; Montazar y Afshar, 2025), tal como el riego por goteo subterráneo, combinado con una aplicación óptima de agua (100 % de evaporación), resultó en un mayor rendimiento de forraje y una mayor eficiencia del uso del agua (EAU) en comparación con el riego superficial (Gutiérrez-Guzmán et al., 2022). Asimismo, la eficiencia en el uso del agua varía significativamente entre las especies forrajeras, por ejemplo, los genotipos altos de pasto elefante mostraron una mayor EAU y acumulación de forraje en comparación con los genotipos enanos bajo riego (Ribeiro et al., 2023).

La importancia de estos términos enfatiza en la tendencia hacia prácticas que promuevan la producción animal con menor impacto ambiental, con relación al forraje y la eficiencia del uso del agua que está influenciada por una combinación de métodos de riego, selección de especies, características genéticas, prácticas de

manejo y condiciones ambientales y optimizar estos factores puede generar mejoras significativas en el rendimiento del forraje y la eficiencia del uso del agua.

Producción y aporte nutricional del forraje

La calidad nutricional de los forrajes es un factor determinante para satisfacer el requerimiento nutricional del ganado vacuno y asegurar la productividad, porque influye directamente en el consumo voluntario, la digestibilidad y la eficiencia de utilización de los nutrientes. En este contexto, estudios recientes evidencian que una mayor digestibilidad de la fibra detergente neutro (FDN) se asocia positivamente con el incremento del consumo de materia seca y con una mayor producción de proteína microbiana ruminal, lo que mejora la disponibilidad de energía y proteína metabolizable en dietas basadas en forrajes tropicales (Detmann et al., 2024). También investigaciones experimentales han demostrado que la calidad del forraje evaluada a través de su composición química y su fermentación en el rumen, condiciona la eficiencia de aprovechamiento de los nutrientes y el desempeño productivo de los rumiantes (de Paula et al., 2024).

La productividad y la salud del ganado en pastoreo dependen principalmente de los nutrientes que obtienen de las especies de pastos, incluyendo proteína (PB), fibra cruda (FB) y elementos minerales (Fenetahun et al., 2021). La composición química y la biodisponibilidad de los nutrientes presentes en el alimento son esenciales para satisfacer los requerimientos metabólicos y fisiológicos del animal, cuando estas características no son adecuadas puede afectar negativamente el crecimiento, la reproducción, la salud y la producción del animal. Investigaciones recientes muestran que la calidad del forraje evaluada a partir de su contenido de fibra, proteína y energía influye directamente en la fermentación ruminal y en la disponibilidad de los nutrientes para el metabolismo del rumiante limitando su desempeño productivo (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 sostenibles (Wróbel et al., 2025).

La tabla 1 muestra diferentes valores nutricionales de forrajes convencionales y no convencionales utilizados para la alimentación de rumiantes. Los forrajes no convencionales responden a la necesidad de alternativas más económicas para reducir los costos de alimentación, no obstante, la disponibilidad de estos forrajes es la principal limitante.

Tabla 1. 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	35.7	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)

Tendencias Científicas y avances en la investigación de forrajes para sistemas ganaderos sostenibles

<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. coerulescens</i>	-	31.50	58.50	28.90	13.30	
<i>C. salsoloides</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		Mwangi et al. (2024)
<i>Chloris gayana</i>	82.20	5.60	73.00	40.00		
<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. hispidium</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	
<i>Acacia melanoxylon</i>	39.43	16.99	64.01	52.22	5.26	Maduro Días et al. (2023)
<i>Pittosporum 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>Pittosporum undulatum</i>	33.43	7.96	38.02	35.59	7.87	
<i>Megathyrsus maximus</i> cv Tanzania	-	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>Megathyrsus maximus</i> cv Guinea	-	12.90	74.80	39.10	11.60	

<i>Pennisetum purpureum</i>		12.85	14.2	56.29	34.67	19.4	
<i>Schumacher x Pennisetum glaucum L.</i>							Morocho et al. (2023)
– Cuba OM 22							

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

Las especies de forraje como *Calliandra calothyrsus* y *Leucaena leucocephala* destacan por sus elevados contenidos de proteína cruda (21.10 % y 18.36 %), colocándolas como forrajes estratégicos para suplementar dietas en sistemas ganaderos con limitaciones proteicas. Se resalta el potencial de las leguminosas arbóreas para mejorar la eficiencia en la utilización de nitrógeno en rumiantes, reduciendo a su vez las emisiones de metano entérico tanto en términos absolutos como por unidad de materia seca ingerida, asimismo las gramíneas como *Pennisetum purpureum* y el híbrido Cuba OM-22 evidencian un balance más favorable entre rendimiento forrajero y fracciones de fibra (FDN 56.29 %), que aseguran altos volúmenes de biomasa para sistemas de producción intensiva (Harrison et al., 2015; Vargas et al., 2023).

La presencia de especies con valores intermedios de fibra como *Gliricidia sepium* o *Acacia melanoxylon* refuerza la importancia de integrar forrajes diversificados en los sistemas ganaderos, lo que contribuye no solo al suministro continuo de nutrientes, sino también a la resiliencia del sistema frente a variaciones estacionales en la disponibilidad de alimento y el potencial de *Opuntia ficus-indica* como recurso alternativo por su aporte energético y capacidad de adaptación a ambientes áridos alineándose con estrategias de mitigación al cambio climático y sostenibilidad productiva.

Enfoque de la investigación y cooperación global en desarrollo

El análisis de nuestra revisión muestra una tasa de crecimiento en la producción de artículos indicando un aumento constante en el interés y la actividad de investigación en el campo, este crecimiento puede mostrar un incremento de relevancia en el tema, así como la evolución y expansión del conocimiento en el tema, en cuanto a los artículos de investigación revisados son de los últimos años, que la mayoría de los estudios son relativamente recientes, lo que implica que la literatura en este campo está actualizada y en sintonía con los desarrollos más recientes, como muestran los siguientes los autores más activos en la investigación se destacan Tahir et al. (2024), Wang et al. (2024) y Kotowski et al. (2023), quienes han contribuido de manera significativa a la literatura en áreas como la optimización de la relación leguminosa-forraje y el uso eficiente de recursos en la producción animal, estos autores han trabajado en colaboración con instituciones de países como Estados Unidos, Brasil, y China, que lideran la investigación en esta área.

Implicaciones para la investigación futura

El análisis de co-ocurrencia revela varias áreas emergentes que podrían beneficiar de una mayor atención en la investigación futura:

Sistemas silvopastoriles

La conexión entre las palabras forage y sustainable intensification (intensificación sostenible) sugiere una creciente relevancia de los sistemas silvopastoriles, estos sistemas integran árboles, ganado y forrajes promoviendo una producción más sostenible a largo plazo, las prácticas de manejo efectivas como el pastoreo rotacional y la poda, son esenciales para mantener el equilibrio entre el crecimiento del forraje y de los árboles (Paciullo et al., 2024; Vieira Junior et al., 2022). Además, la integración de árboles y pastoreo de ganado ha sido reconocida por su potencial para mejorar la calidad del forraje, mejorar la sostenibilidad ambiental y brindar beneficios económicos (Sow et al., 2024). Se necesitan estudios a largo plazo para perfeccionar estas prácticas y desarrollar directrices adaptadas a diferentes condiciones ambientales.

Eficiencia en la captación de nutrientes

El análisis muestra una fuerte conexión entre nitrogen uptake (captación de nitrógeno) y tropicales forrajes (forrajes tropicales), destacando la necesidad de investigar más sobre cómo maximizar la absorción de nutrientes en especies tropicales para mejorar la productividad ganadera como menciona (Carvajal-Tapia et al., 2021). Asimismo, como la edad del forraje tiene una relación con algunos estudios que mencionan que las especies forrajeras y la madurez tiene una profunda influencia en el suministro de nutrientes y presenta una perspectiva para seleccionar las mejores especies forrajeras e identificar el estado óptimo de madurez de cosecha de alta calidad nutricional y menor potencial de emisión de CH₄ (Khan et al., 2017), también el aporte nutricional es influenciado por la estación (Cooke et al., 2024).

Retos actuales y futuros

La adaptación al cambio climático implica abordar desafíos como la escasez de agua y las temperaturas altas, lo cual sigue siendo una prioridad. Por ello las estrategias de producción sostenible de forrajes deben adaptarse a estas condiciones cambiantes para garantizar su viabilidad a largo plazo (Shit, 2019). Otro reto relevante está asociado a las emisiones de gases de efecto invernadero, la producción ganadera contribuye significativamente a las emisiones de gases que incluyen el metano de los rumiantes y el óxido nítrico de la gestión del estiércol, representando un reto actual y futuro en términos de sostenibilidad ambiental (Peters et al., 2013; Place, 2024).

Frente a estos desafíos la intensificación sostenible se presenta como una estrategia clave para afrontar los retos futuros del sector ganadero. Prácticas como la mejora de la calidad del forraje y la rehabilitación de las tierras de pastoreo pueden mejorar la productividad y al mismo tiempo reducir los impactos ambientales (Mamphogoro et al., 2024; McCoard et al., 2020).

Conclusiones

La producción de forrajes constituye un componente esencial para la sostenibilidad de los sistemas de producción animal debido a su influencia directa en la productividad, la eficiencia alimenticia y el impacto ambiental de la ganadería. El análisis bibliométrico realizado evidencia un crecimiento sostenido de la investigación científica en esta área durante los últimos años, así como un aumento en la colaboración internacional orientada a mejorar el manejo y la utilización de los recursos forrajeros. Asimismo, la literatura analizada muestra un interés creciente en la integración de tecnologías emergentes como sensores remotos,

drones e inteligencia artificial para mejorar la estimación de la productividad forrajera, optimizar la gestión de los cultivos y evaluar su impacto ambiental, particularmente en relación con la huella de carbono de los sistemas ganaderos.

Sin embargo persisten importantes vacíos de investigación relacionados con la integración entre la producción de forrajes, su calidad nutricional y su impacto en la sostenibilidad ambiental de los sistemas pecuarios, en este contexto futuras investigaciones deberían orientarse al desarrollo de enfoques interdisciplinarios que permitan optimizar la producción de forrajes y fortalecer la sostenibilidad de la ganadería frente a desafíos globales como el cambio climático y la creciente demanda de alimentos.

Referencias

- Adar, S., Paz-Kagan, T., Argaman, E., Dubinin, M. V., & 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., Stefenoni, 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., McIvor, 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., de Haro Marti, M. E., de Almeida Teixeira, I. A. M., 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 & Agriculture*, 10(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2405881>
- Azimi, M., Heshmati, G. A., Farahpour, M., Faramarzi, M., & Abbaspour, K. C. (2013). Modeling the impact of rangeland management on forage production of sagebrush species in arid and semi-arid regions of Iran. *Ecological Modelling*, 250, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.10.017>
- 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., Machekano, 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 supplemental feeds. *Food Security*, 16(3), 607–622. <https://doi.org/10.1007/s12571-024-01452-1>
- Crotty, F. V., Fychan, R., Theobald, V. J., Sanderson, R., Chadwick, D. R., & Marley, C. L. (2014). The impact of using alternative forages on nutrient value within slurry and implications for forage productivity. *PLoS ONE*, 9(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097516>
- Detmann, E., Sousa, L. C. O., Lima, N. S. A., & Franco, M. O. (2024). 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>
- Eugène, M., Klumpp, K., & Sauvant, 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>
- Gaviria-Urbe, X., Bolivar, D. M., Rosenstock, T. S., Molina-Botero, I. C., Chirinda, N., Barahona, R., & Arango, J. (2020). Nutritional quality, intake and methane emissions of diets based on Cayman grass and *Leucaena*. *Frontiers in Veterinary Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.579189>
- Gislon, G., Colombini, S., Borreani, G., Crovetto, G. M., Sandrucci, A., Galassi, G., Tabacco, E., & Rapetti, L. (2020). Milk production, methane emissions and energy balance in cows fed different forage systems. *Journal of Dairy Science*, 103(9), 8048–8061. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-18134>
- Harrison, M. T., McSweeney, C., Tomkins, N. W., & Eckard, R. J. (2015). Improving greenhouse gas emissions in tropical beef systems using *Leucaena leucocephala*. *Agricultural Systems*, 136, 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.03.003>
- Hristov, A. N. (2023). Could dairy cow nutrition reduce the carbon footprint of milk production? *Journal of Dairy Science*, 106(11), 7336–7340. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23461>
- Mwangi, P. M., Eckard, R., Gluecks, I., Merbold, L., Mulat, D. G., Gakige, J., Marquardt, S., & Pinares-Patino, C. S. (2024). Supplementation of tropical forage with *Calliandra calothyrsus* improves sheep performance and reduces methane emission. *Frontiers in Animal Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fanim.2024.1296203>
- Paciullo, D. S. C., Pires, M. F. Á., Müller, M. D., & Maurício, R. M. (2024). Silvopastoral systems as an alternative for dairy cattle production in tropical pastures. In *Silvopastoral systems of Meso America and Northern South America* (pp. 105–115). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43063-3_6
- Place, S. E. (2024). Environmental sustainability of livestock systems. *Meat and Muscle Biology*, 8(1). <https://doi.org/10.22175/mmb.18117>
- Sow, S., Ranjan, S., Kumar, N., Gitari, H., Dayal, P., & Kumar, S. (2024). Sustainable fodder production through silvopastoral systems. *Current Science*, 126(10).
- Adar, S., Paz-Kagan, T., Argaman, E., Dubinin, M. (Vladislav), & Sternberg, M. (2024). Identifying climatic drivers of forage quantity and quality in Mediterranean rangelands using remote sensing. *Science of the Total Environment*, 957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177797>
- Adeniji, Y. A., Bomberger, R., Goodall, S. R., Hristov, A. N., Stefenoni, 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., McIvor, J., Milne, J., Morris, C., Peeters, A., & Sanderson, M. (2011). An international terminology for grazing lands and grazing animals. In *Grass and Forage Science* (Vol. 66, Number 1, pp. 2–28). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2010.00780.x>
- Ammar, H., Kholif, A. E., Henrique Horst, E., de Haro Marti, M. E., de Almeida Teixeira, I. A. M., 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). <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2405881>
- Azimi, M., Heshmati, G. A., Farahpour, M., Faramarzi, M., & Abbaspour, K. C. (2013). Modeling the impact of rangeland management on forage production of sagebrush species in arid and semi-arid regions of Iran. *Ecological Modelling*, 250, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.10.017>
- Carvajal-Tapia, J. I., Morales-Velasco, S., Villegas, D. M., Arango, J., & Vivas-Quila, N. J. (2021). Biological nitrification inhibition and forage productivity of *Megathyrsus 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. In *Atmosphere* (Vol. 13, Number 1). MDPI. <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. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 291). Academic Press. <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>
- Crotty, F. V., Fychan, R., Theobald, V. J., Sanderson, R., Chadwick, D. R., & Marley, C. L. (2014). The impact of using alternative forages on the nutrient value within slurry and its implications for forage productivity in agricultural systems. *PLoS ONE*, 9(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097516>
- de Paula, M. F. F. V., Marques, R. S., Pires, A. V., Soares, L. C. B., Limede, 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. <https://doi.org/10.1093/tas/txae107>
- De Vega, J. J., Ayling, S., Hegarty, M., Kudrna, D., Goicoechea, J. L., Ergon, Å., 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., ... Skøt, L. (2015). Red clover (*Trifolium pratense* L.) draft genome provides a platform for trait improvement. *Scientific Reports*, 5. <https://doi.org/10.1038/srep17394>
- 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. de, 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. <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. In *Agronomy* (Vol. 12, Number 8). MDPI. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081818>
- Epifanio, P. S., De Pinho Costa, K. A., Da Costa Severiano, E., Ferreira De Souza, W., Teixeira, D. A. A., Torres Da Silva, J., & De Moura Aquino, 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. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.724628>
- Eugène, M., Klumpp, K., & Sauvart, D. (2021). Methane mitigating options with forages fed to ruminants. In *Grass and Forage Science* (Vol. 76, Number 2, pp. 196–204). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/gfs.12540>
- 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. <https://doi.org/10.7717/peerj.12204>
- Fioreli, 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>
- Gaviria-Urbe, X., Bolivar, D. M., Rosenstock, T. S., Molina-Botero, I. C., Chirinda, N., Barahona, R., & Arango, J. (2020). Nutritional Quality, Voluntary Intake and Enteric Methane Emissions of Diets Based on Novel Cayman Grass and Its Associations With Two *Leucaena* Shrub Legumes. *Frontiers in Veterinary Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.579189>
- Ghalkhani, A., Golzardi, F., Khazaei, A., Mahrokh, 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). <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). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac4d1>
- Ginwal, 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>
- Gislon, G., Colombini, S., Borreani, G., Crovetto, 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>
- Grinnell, N. A., van der Linden, A., Azhar, B., Nobilly, F., & Slingerland, M. (2022). Cattle-oil palm integration – a viable strategy to increase Malaysian beef self-sufficiency and palm oil sustainability. *Livestock Science*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104902>
- 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*. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3281>
- 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>
- 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). <https://doi.org/10.1186/s13002-017-0184-5>
- Hernández-Arboleda, X., Ortiz-Grisales, S., Vivas-Arturo, W. F., Fernández-Romay, Y., O-León, O. La, 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). <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>
- 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. In *The J. Anim. Plant Sci* (Vol. 27, Number 4).
- Kotowski, M., Kotowska, D., Biró, M., Babai, D., Sharifian, A., Szentes, 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). <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. In A. D. Nciizah, A. Roopnarain, 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. *Animal Agriculture: Sustainability, Challenges and Innovations*, 231–246. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817052-6.00013-6>
- Mesquita Da Silva, G., Ferreira Da Silva, F., Teixeira Viana, P., Santana, E., Rodrigues, O., Charles, ;, Moreira, N., Murilo, ;, Meneses, A., De Souza, J., Júnior, A., Cassyo, ;, Rufino, A., Luan, ;, & Barreto, S. (n.d.). *Publicações em Medicina Veterinária e Zootecnia Avaliação de forrageiras tropicais: Revisão Tropical forage evaluation: Review*. Retrieved www.pubvet.com.br
- Moeinnamini, A., Weisany, W., Hadi, M. R. H. S., Torkashvand, A. M., & Mohammadinejad, A. (2024). Enhancing Photosynthesis Pigment, Protein Content, Nutrient Uptake and Yield in Maize (*Zea mays* L.) Cultivars Using Vermicompost, Livestock Manure and *Azotobacter chroococcum*. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(4), 6999–7009. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-02019-x>
- Montazar, A., & Afshar, R. K. (2025). Chapter One - Climate-smart water technologies and strategies for a resilient forage production system. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 191, pp. 1–45). Academic Press. <https://doi.org/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* Schumach x *Pennisetum glaucum* L.) at three cutting ages[Evaluación del potencial forrajero y composición nutricional del pasto híbrido Cuba OM-22 (Pe.... *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. <https://doi.org/10.3389/fanim.2024.1296203>
- 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). <https://doi.org/10.3390/ani12243587>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2025). *Datos clave | Sistemas pecuarios | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. FAO. <https://www.fao.org/livestock-systems/resources/key-facts/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2022). *Producción animal*. FAO. <https://www.fao.org/animal-production/en/>
- Paciullo, D. S. C., de Fátima Ávila Pires, M., Müller, M. D., & Maurício, R. M. (2024). Silvopastoral Systems as an Alternative of Dairy Cattle Production in Tropical Pastures. In *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
- Pasquini Neto, R., Furtado, A. J., Da Silva, G. V., Lobo, A. A. G., Abdalla Filho, A. L., Brunetti, H. B., Bosi, C., Pedroso, 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). <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. In *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales* (Vol. 1). www.tropicalgrasslands.infowww.ciat.cgiar.orgwww.jircas.affrc.go.jpwww.cipav.orgwww.iis-rio.orgwww.corpoica.org
- Piccirillo, B., Ponte, M., Pipi, M., Di Grigoli, A., Bonanno, A., Cutrignelli, M. I., Vastolo, A., & Calabrò, S. (2025). Pelleted Sulla Forage (*Hedysarum coronarium* L.) as a Resource for Sheep Feeding Systems: In Vitro Nutritional Value and Sustainability Perspectives. *Animals*, 15(15). <https://doi.org/10.3390/ani15152322>
- Place, S. E. (2024). Environmental Sustainability of Livestock Systems. *Meat and Muscle Biology*, 8(1). <https://doi.org/10.22175/mmb.18117>
- 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/DOI:10.1017/S0021859623000461>
- Shit, N. (2019). HYDROPONIC FODDER PRODUCTION: AN ALTERNATIVE TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE LIVESTOCK PRODUCTION IN INDIA. In *Exploratory Animal and Medical Research* (Vol. 9, Number 2). www.animalmedicalresearch.org
- Shri Rangasami, S. R., Purnima, M., Pushpam, R., Ajaykumar, R., Thirunavukkarasu, M., Sathiya, K., Rajanbabu, V., & Yazhini, G. (2024). Enhancing Animal Nutritional Security Through Biofortification in Forage Crops: A Comprehensive Review. In *Indian Journal of Animal Research* (Vol. 58, Number 11, pp. 1838–1845). Agricultural Research Communication Centre. <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 [Composición química de cuatro gramíneas forrajeras del estado de 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. In *CURRENT SCIENCE* (Vol. 126, Number 10). <http://www.igfri.ernet.in>
- 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 Sub-Tropics. *Sustainability (Switzerland)*, 16(10). <https://doi.org/10.3390/su16104070>

- 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). https://doi.org/10.21930/rcta.vol26_num1_art:3608
- 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 (Switzerland)*, 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 biochar* L.) varieties at the physiological maturity stage. *Heliyon*, 11(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41753>
- Uzcátegui-Varela, J. P., Chompre, K., Castillo, D., Rangel, S., Briceño-Rangel, A., & Piña, A. (2022). Nutritional assessment of tropical pastures as a sustainability strategy in dual-purpose cattle ranching in the South of Lake Maracaibo, Venezuela. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21(7), 432–439. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.11.005>
- Vargas, J. J., Pabón, M. L., & Carulla, J. E. (2023). Methane emissions from rams fed kikuyu hay or kikuyu-lotus hay mixture [Producción de metano de corderos alimentados con heno de kikuyo y kikuyo:lotus]. *Archivos de Zootecnia*, 72(278), 92–98. <https://doi.org/10.21071/az.v72i278.5711>
- Vieira Junior, N. A., Evers, J., dos Santos Vianna, M., 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. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103316>
- Wang, T., Wang, B., Xiao, A., & Lan, J. (2024a). Optimizing Seeding Ratio for Legume Forage to Maximize System Productivity and Resource Use Efficiency in Mixed Cropping Systems. *Agriculture (Switzerland)*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/agriculture14081249>
- Wang, T., Wang, B., Xiao, A., & Lan, J. (2024b). Optimizing Seeding Ratio for Legume Forage to Maximize System Productivity and Resource Use Efficiency in Mixed Cropping Systems. *Agriculture (Switzerland)*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/agriculture14081249>
- Wróbel, B., Zielewicz, W., & Paszkiewicz-Jasińska, A. (2025). Improving Forage Quality from Permanent Grasslands to Enhance Ruminant Productivity. In *Agriculture (Switzerland)* (Vol. 15, Number 13). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/agriculture15131438>
- Zhai, X., Zhang, Y., Wang, K., Chen, Q., Li, S., & Huang, D. (2018). Grazing effects on the nutritive value of dominant species in steppe grasslands of northern China. *BMC Ecology*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12898-018-0186-8>