

Modelos Matemáticos para la simulación energética en sistemas ganaderos: un estado del arte

Mathematical Models for Energy Simulation in Livestock Systems: A State of the Art

 Mario César Bernal-Ovalle^{1*},  Luis Miguel Acosta-Urrego¹,
 Jimmy Efrén Moreno-Sandoval¹ and  Yanoy Morejón-Mesa²

¹Universidad de Cundinamarca, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Cundinamarca, Colombia.

E-mail: mcbernal@ucundinamarca.edu.co, lmacosta@ucundinamarca.edu.co y jefrenmoreno@ucundinamarca.edu.co

²Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias

Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. E-mail: ymorejon83@gmail.com

*Autor para correspondencia: mcbernal@ucundinamarca.edu.co

RESUMEN: Los sistemas de producción bovina hacen parte de una de las actividades productivas más relevantes en América Latina, debido a su aporte a la seguridad alimentaria y el papel que tiene en la economía rural campesina. Sin embargo, su desarrollo progresivo en los últimos años ha generado cuestionamientos en torno a la sostenibilidad ambiental, económica y social, factores no favorables por dicho progreso. En este sentido, el análisis del flujo de energía y la adaptación de los recursos naturales en los sistemas de producción bovina se convierte en una necesidad crítica para avanzar hacia modelos más eficientes. Este artículo presenta una revisión sistemática de la literatura científica sobre la aplicación de modelos matemáticos, energéticos y emergéticos en sistemas de producción bovina. Explorando enfoques clásicos de crecimiento animal, herramientas y software de simulación multivariada, y métodos emergéticos basados en indicadores como el EYR, ELR y ESI. Asimismo, se analizan algunos estudios de caso sobresalientes en América Latina y Europa, destacando fortalezas, limitaciones y posibilidades de integración metodológica. Por lo tanto, se proponen cinco líneas estratégicas para el desarrollo de modelos híbridos contextualizados.

Palabras clave: eficiencia energética, seguridad alimentaria, economía rural agroecosistemas.

ABSTRACT: Bovine production systems represent one of the most significant productive activities in Latin America due to their contribution to food security and their role in the rural peasant economy. However, their progressive development in recent years has raised concerns regarding environmental, economic, and social sustainability-factors that have not evolved favorably alongside such growth. In this context, analyzing energy flows and the adaptation of natural resources within bovine production systems becomes a critical need to advance toward more efficient and sustainable models. This article presents a systematic review of the scientific literature on the application of mathematical, energetic, and emergy-based models in bovine production systems. It explores classical approaches to animal growth, multivariate simulation tools and software, and emergy analysis methods using indicators such as EYR (Emergy Yield Ratio), ELR (Environmental Loading Ratio), and ESI (Emergy Sustainability Index). Additionally, it examines notable case studies from Latin America and Europe, highlighting methodological strengths, limitations, and opportunities for integration. As a result, five strategic lines are proposed for the development of context-specific hybrid modeling frameworks.

Keywords: Energy Efficiency, Food Security, Rural Economy, Agriculture Ecosystems.

INTRODUCCIÓN

Entre las herramientas que permiten abordar estos desafíos se destaca el análisis de emergía, un enfoque sistémico propuesto por Odum (1996) que evalúa la energía acumulada directa e indirectamente para generar bienes y servicios en un sistema, expresada en unidades equivalentes de energía solar (sej). A diferencia de otras métricas energéticas convencionales,

la emergía integra los costos ambientales ocultos y permite evaluar la sostenibilidad a partir del desempeño ecológico total del sistema (Vigne *et al.*, 2013; Rotolo *et al.*, 2007). En sistemas ganaderos, este enfoque ha sido utilizado para comparar modelos extensivos e intensivos, estimar el soporte ecológico requerido por las prácticas productivas y establecer indicadores de eficiencia ambiental como el EYR, ELR o ESI.

Recibido: 14/02/2025

Aceptado: 01/07/2025

Conflicto de intereses: Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Author contributions: **Conceptualization:** M. Bernal-Ovalle, Data curation: M. Bernal-Ovalle, L. Acosta-Urrego, J. Moreno-Sandoval.

Formal Analysis: M. Bernal-Ovalle, **Investigation:** M. Bernal-Ovalle, L. Acosta-Urrego, J. Moreno-Sandoval, Y. Morejón-Mesa.

Methodology: M. Bernal-Ovalle, Software: M. Bernal-Ovalle, L. Acosta-Urrego, J. Moreno-Sandoval, Y. Morejón-Mesa. **Supervision:** M. Bernal-Ovalle, L. Acosta-Urrego, J. Moreno-Sandoval, Y. Morejón-Mesa. **Validation:** M. Bernal-Ovalle, L. Acosta-Urrego, J. Moreno-Sandoval, Y. Morejón-Mesa. **Visualization:** M. Bernal-Ovalle,

Writing - original draft: M. Bernal-Ovalle, L. Acosta-Urrego, J. Moreno-Sandoval, Y. Morejón-Mesa. **Writing - review & editing:** M. Bernal-Ovalle, J. Moreno-Sandoval, Y. Morejón-Mesa.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



En paralelo, el avance en las ciencias computacionales y los métodos cuantitativos ha favorecido el desarrollo de modelos matemáticos que permiten simular el comportamiento energético de los sistemas pecuarios bajo distintos escenarios de manejo, clima y demanda (Tedeschi, 2004; Gómez et al., 2006). Modelos como los de Brody, Gompertz, Richards y Von Bertalanffy, tradicionalmente usados para describir el crecimiento animal, han sido adaptados para predecir consumo de energía, flujos metabólicos y eficiencia de conversión en bovinos de carne y leche. Además, técnicas multivariadas como el análisis de componentes principales (PCA) y la clasificación en clústeres han sido clave para caracterizar tipologías productivas, como lo evidencian estudios recientes en Colombia (Cruz et al., 2023; Durana et al., 2023).

A pesar de estos avances, existe una fragmentación importante en la literatura respecto a la integración de modelos matemáticos con análisis de energía en sistemas ganaderos. Las investigaciones suelen centrarse en aspectos productivos o energéticos de forma aislada, sin articular una visión holística que permita comprender la complejidad biofísica, socioeconómica y ecológica de los sistemas bovinos (Postigo et al., 2024; Molina et al., 2025). Esta brecha limita la formulación de estrategias de intensificación sostenible, especialmente en contextos rurales y de pequeña escala, donde las decisiones productivas deben considerar tanto los límites ecológicos como los saberes locales.

Por tanto, el presente artículo tiene como objetivo realizar un estado del arte sobre los modelos matemáticos aplicados a la simulación energética y emergética en sistemas ganaderos bovinos, con especial énfasis en su uso como herramientas para el diagnóstico y rediseño de sistemas productivos más sostenibles. Se revisarán modelos clásicos y contemporáneos, su aplicabilidad en diversos contextos agroecológicos, las métricas e indicadores utilizados, y las tendencias emergentes en la modelación de agroecosistemas bovinos desde una perspectiva sistémica.

DESARROLLO DEL TEMA

Fundamentos de simulación y modelación en agroecosistemas ganaderos

El análisis de los agroecosistemas ganaderos, y en particular de los sistemas bovinos de carne y leche, requiere enfoques metodológicos que permitan capturar su complejidad biofísica, ecológica y socioeconómica. Estos sistemas funcionan como unidades abiertas e interdependientes, donde interactúan factores climáticos, edáficos, biológicos, tecnológicos y humanos, que afectan tanto la eficiencia productiva como la sostenibilidad energética (Tedeschi, 2004; Durana et al., 2023). Por esta razón, el uso de modelos matemáticos y simulaciones ha cobrado gran relevancia para representar, analizar y proyectar el comportamiento dinámico de estos sistemas bajo distintos escenarios.

El enfoque sistémico y la dinámica de los sistemas ganaderos

El enfoque sistémico, propuesto inicialmente por Odum (1996) permite identificar los procesos internos (crecimiento, reproducción, conversión de alimento en biomasa) como los externos (entrada de energía solar, insumos externos, servicios ecosistémicos), los cuales representan los flujos de materia y energía presentes dentro del agroecosistema de los sistemas de producción bovina. Bajo esta perspectiva, los modelos no solo cuantifican salidas productivas, sino que también valoran los costos ocultos y las dependencias del sistema respecto a su entorno biofísico.

Este enfoque ha sido útil para comparar sistemas de manejo contrastantes (extensivos vs. intensivos), identificar puntos críticos de pérdida energética, y evaluar el soporte ecológico necesario para mantener la producción (Vigne et al., 2013; Cruz et al., 2023). Además, permite integrar elementos socioambientales como la resiliencia climática, el uso del suelo y la sostenibilidad territorial (Postigo et al., 2024).

Tipos de modelos matemáticos aplicados en ganadería

Existen múltiples tipos de modelos utilizados para simular procesos en sistemas ganaderos, los cuales pueden clasificarse según su estructura y propósito en:

Modelos determinísticos, como los de Brody, Gompertz, Richards o Von Bertalanffy, que describen el crecimiento animal mediante funciones matemáticas ajustadas a datos de peso, edad o consumo. Estos modelos han sido aplicados tanto a razas de carne como de leche, y permiten predecir el comportamiento productivo bajo condiciones estándar (Gómez et al., 2008).

Modelos estocásticos y probabilísticos, que incorporan incertidumbre y variabilidad en los parámetros de entrada, como los modelos Monte Carlo o bayesianos, útiles para simular escenarios de riesgo, cambios en disponibilidad de alimento o variabilidad climática (Tedeschi, 2004).

Modelos multivariados, entre los que destacan el análisis de componentes principales (PCA), análisis de conglomerados (clúster) y técnicas de reducción de dimensionalidad. Estas herramientas permiten clasificar fincas ganaderas según clima, altitud, uso de tecnologías, productividad y eficiencia energética, como lo evidencian estudios realizados en Cundinamarca y el altiplano andino (Cruz et al., 2023; Molina et al., 2025).

Modelos de simulación sistémica, como los desarrollados con EmSim, que emplean ecuaciones diferenciales y diagramas energéticos según Odum (1996) para modelar flujos de energía, acumulación de recursos, eficiencia ecológica y transformación de productos ganaderos (Rotolo et al., 2007).

Modelación energética y emergética

La modelación energética tradicional en ganadería bovina se ha enfocado en estimar el consumo y aprovechamiento de energía en forma de alimentos, trabajo humano, energía fósil, maquinaria e insumos.

Estos modelos permiten calcular el balance energético neto, la eficiencia de conversión, o la productividad energética, y han sido fundamentales para determinar la viabilidad técnica de diferentes esquemas de producción (Durana *et al.*, 2023; Cruz *et al.*, 2023).

Sin embargo, esta perspectiva suele omitir los costos ambientales ocultos y los servicios ecosistémicos utilizados de forma indirecta. Es aquí donde la modelación emergética aporta una visión más holística al considerar no solo la cantidad de energía, sino su calidad, origen y nivel de transformación. El enfoque emergético, desarrollado por Odum (1996), permite representar los flujos acumulados de energía solar equivalente (seJ) necesarios para mantener los procesos ecológicos y productivos en un sistema ganadero.

A partir de estos flujos se construyen indicadores emergéticos que han sido ampliamente validados en estudios de sostenibilidad agropecuaria (Rotolo *et al.*, 2007; Vigne *et al.*, 2013). Entre los más relevantes se encuentran: Índice de Retorno de Emergía (EYR): mide cuánta emergencia se genera por cada unidad de emergencia invertida desde fuera del sistema. Valores altos indican sistemas con mayor auto-suficiencia o dependencia de recursos locales (como forrajes nativos y lluvia). Ejemplo: un sistema extensivo con forraje natural y mínima mecanización puede tener un EYR > 8, mientras que un sistema intensivo con alto uso de concentrado puede tener EYR < 2.

Índice de Carga Ambiental (ELR): representa la presión sobre el ambiente al relacionar emergencia no renovable y servicios humanos contra emergencia renovable. Valores bajos indican menor impacto ambiental. Ejemplo: un sistema intensivo con fertilización sintética, combustibles fósiles y maquinaria puede tener un ELR > 3, lo que sugiere alta dependencia de recursos externos.

Índice de Sostenibilidad Emergética (ESI): es la razón entre EYR y ELR. Integra rendimiento y carga ambiental en un solo indicador. Un ESI > 5 indica un sistema sostenible; un ESI < 1 sugiere insostenibilidad. Ejemplo: sistemas pastoriles con manejo agroecológico pueden tener ESI > 20, mientras que sistemas industrializados pueden caer por debajo de 0,5.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Partiéndose del objetivo planeado referente a los modelos matemáticos aplicados a la simulación energética y emergética en sistemas ganaderos bovinos, con especial énfasis en su uso como herramientas para el diagnóstico y rediseño de sistemas productivos más sostenibles. Se revisarán modelos clásicos y contemporáneos, su aplicabilidad en diversos contextos agroecológicos, las métricas e indicadores utilizados, y las tendencias emergentes en la modelación de agroecosistemas bovinos desde una perspectiva sistémica.

Revisión del estado del arte sobre modelación energética y emergética en ganadería bovina

En las últimas dos décadas, la literatura científica ha presentado un interés progresivo por el uso de modelos matemáticos y análisis de flujos energéticos

para evaluar el desempeño y la sostenibilidad de los sistemas ganaderos bovinos. Esta revisión del estado del arte se organiza en tres ejes: (i) estudios que aplican modelos de crecimiento animal con fines energéticos; (ii) investigaciones que modelan flujos de energía o emergencia en sistemas productivos; (iii) trabajos que integran análisis multivariados o simulaciones avanzadas para clasificar o rediseñar sistemas ganaderos; y las brechas y oportunidades de la modelación en sistemas de producción bovina.

Aplicación de modelos de crecimiento animal con fines energéticos (versión extendida)

Los modelos de crecimiento animal han sido tradicionalmente utilizados para describir el desarrollo biológico del ganado, pero su aplicación en el análisis energético ha permitido vincularlos con simulaciones de consumo, eficiencia alimentaria y predicción de requerimientos energéticos (Gómez *et al.*, 2006). Entre los modelos más destacados se encuentran los de Brody, Gompertz, Richards y Von Bertalanffy.

Estos modelos, al ser ajustados a datos productivos reales, permiten estimar la energía necesaria para mantener ciertas tasas de crecimiento, proyectar la eficiencia de conversión alimentaria y mejorar la planificación nutricional (Perdigón & González, 2020). Integraciones recientes con lenguajes de programación como R, Python o plataformas de simulación como Stella han fortalecido su utilidad.

Modelación energética y emergética en sistemas ganaderos

La modelación energética convencional en ganadería se ha centrado en estimar la relación entre entradas y salidas de energía en los sistemas productivos. Las entradas incluyen alimentos (forrajes, concentrados), energía fósil (combustibles, electricidad), mano de obra y medicamentos, mientras que las salidas abarcan carne, leche, estiércol y otros productos derivados (Durana *et al.*, 2023; Cruz *et al.*, 2023). Estas evaluaciones permiten construir balances energéticos y analizar la eficiencia de conversión, pero a menudo no consideran la calidad ni la procedencia de la energía utilizada.

En respuesta a estas limitaciones, el enfoque emergético ha ganado terreno como una alternativa integral. Propuesto por Odum (1996), este enfoque introduce el concepto de emergencia como la cantidad total de energía solar equivalente (seJ) requerida para producir un servicio o producto. Esto incluye tanto energía directa (solar, hidráulica, calor) como indirecta (recursos acumulados como suelo, agua o energía humana), permitiendo una evaluación más completa del impacto ecológico de los sistemas productivos.

En ganadería, esta perspectiva se ha aplicado en diferentes regiones del mundo:

En Argentina, Rotolo *et al.* (2007) realizaron un análisis emergético de un sistema de cría de bovinos de carne en la región pampeana, determinando que el 86% de la emergencia utilizada provenía de recursos renovables. Este tipo de producción mostró un EYR superior a 8 y un ELR de 0.35, lo cual refleja alta eficiencia y bajo impacto ambiental.

En el Pantanal brasileño, Aguiar *et al.* (2010) encontraron que los sistemas tradicionales de ganadería extensiva utilizaban en un 98% recursos renovables, logrando ESI por encima de 20, valores que colocan a estos sistemas como referencias de sostenibilidad desde la óptica emergética.

En Francia, Vigne *et al.* (2013) compararon sistemas lecheros intensivos y extensivos, observando que los primeros dependían fuertemente de insumos externos, con un EYR < 2 y ELR > 3.5, lo que redujo drásticamente su sostenibilidad ambiental.

En Brasil y Colombia, Molina *et al.* (2025) reportan que los sistemas semi-intensivos e intensivos pueden mejorar su ESI mediante la integración de prácticas agroecológicas, como rotación de potreros, sistemas silvopastoriles y uso de abonos orgánicos.

Un aspecto destacable en la modelación emergética es el uso de herramientas como EmSim, una plataforma basada en el lenguaje de sistemas energéticos de Odum (1996), que permite traducir diagramas de flujo energético en ecuaciones matemáticas. Esta herramienta, aunque poco utilizada en América Latina, representa una oportunidad para simular interacciones complejas entre componentes del sistema y evaluar escenarios futuros con base en indicadores emergéticos fundamentales.

Análisis multivariado y simulación para caracterización de sistemas

Desde la perspectiva de la variabilidad que presentan los sistemas de producción bovina (determinada por factores como clima, altitud, escala, razas, infraestructura y acceso a tecnología), los modelos estadísticos multivariados son herramientas poderosas para la tipificación y clasificación de sistemas productivos. Estos métodos no solo permiten disminuir la complejidad de grandes volúmenes de datos si no también agruparlos en unidades de producción con características similares, permitiendo la toma de decisiones y la diferenciación de patrones.

En Colombia, Cruz *et al.* (2023) demuestran el desarrollo de un análisis de componentes principales (PCA) y clústeres jerárquicos sobre 68 fincas ganaderas en Cundinamarca, obteniendo una clasificación de los sistemas en tres grupos según su grado de tecnificación, tipo de producción (carne, leche, doble propósito) y variables climáticas. Esta segmentación permitió identificar las fortalezas y limitaciones de cada tipo, relacionándolas con su desempeño energético y ambiental.

De forma complementaria, Durana *et al.* (2023) desarrollaron un ejercicio participativo de simulación en el altiplano andino colombiano para rediseñar sistemas lecheros de pequeña escala. En este caso, se integraron métodos cuantitativos con enfoques cualitativos, utilizando simulaciones productivas y herramientas de evaluación de sostenibilidad (energía, huella hídrica, carbono y capitales comunitarios). Este tipo de trabajo multidimensional fortalece la validación social de los modelos propuestos y mejora la apropiación por parte de los actores locales.

A nivel internacional, se ha observado una tendencia creciente al uso de enfoques híbridos que combinan simulación energética, modelación matemática, análisis multivariado y herramientas de optimización. Tedeschi (2004) propone una arquitectura general para validar modelos de simulación pecuaria, destacando la importancia de establecer criterios de robustez, precisión y aplicabilidad contextual.

Adicionalmente, técnicas como redes neuronales, algoritmos genéticos y análisis bayesiano están empezando a ser utilizadas en la simulación de eficiencia energética y en la predicción de respuestas productivas ante cambios ambientales o de manejo.

Evaluación de los modelos existentes en la modelación energética y emergética ganadera

El uso de modelos energéticos y emergéticos aplicados a sistemas ganaderos ha permitido avanzar notablemente en la comprensión de procesos complejos relacionados con la conversión de energía y la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, al analizar críticamente los enfoques más utilizados, se evidencian limitaciones estructurales, falencias metodológicas y desafíos contextuales que aún deben ser superados para potenciar su valor científico, su aplicabilidad técnica y su pertinencia en distintos territorios.

Fortalezas de los modelos actuales

Los modelos utilizados en el análisis de sistemas ganaderos permiten abordar la complejidad de estos entornos productivos mediante esquemas que simplifican su estructura sin perder de vista su lógica funcional. Herramientas como los diagramas energéticos de Odum (1996), implementados en plataformas EmSim, o los métodos estadísticos multivariados disponibles en lenguajes R, facilitan la disgregación de los agroecosistemas objeto de estudio en elementos fundamentales (entradas, procesos internos y productos derivados) permitiendo analizar con mayor claridad sus relaciones, puntos críticos y niveles de eficiencia. Una de las ventajas sobresaliente de estos enfoques es su capacidad de adaptación, ya que permiten aplicarse a distintos tipos de sistemas de producción bovina (carne, leche o sistemas mixtos) además, ajustarse a los diferentes sistemas de tecnificación o ausencia de estos. Modelos clásicos como los de Brody o Gompertz han demostrado gran utilidad tanto en sistemas extensivos como intensivos, siendo calibrados de manera exitosa en diversos contextos productivos (Gómez *et al.*, 2008).

Además de su capacidad descriptiva, la modelación emergética ofrece una perspectiva cuantitativa de gran valor en los diferentes sistemas, gracias a la aplicación de indicadores estandarizados como el Índice de Retorno de Energía (EYR), el Índice de Carga Ambiental (ELR) y el Índice de Sostenibilidad (ESI). Estos parámetros permiten establecer comparaciones entre sistemas de producción bovina con estructuras diversas,

facilitando la evaluación de su desempeño ambiental y proyectando su comportamiento en escenarios productivos (Rotolo *et al.*, 2007; Vigne *et al.*, 2013). Cuando estos modelos se integran con herramientas tecnológicas de simulación computacional, se amplían las posibilidades de análisis, debido a la posibilidad de explorar la respuesta de los sistemas ante factores de cambio como alteraciones climáticas, fluctuaciones en los precios de insumos o transformaciones en la normativa territorial. En ese sentido, la modelación se convierte en un instrumento estratégico fundamental para predecir escenarios y orientar decisiones técnicas y de política en un entorno agropecuario marcado por la incertidumbre.

Limitaciones identificadas

A pesar de que la modelación energética y emergética ha demostrado importantes avances en la aplicación a los sistemas ganaderos, enfrenta limitaciones que impiden su uso generalizado, en especial dentro de contextos rurales. Uno de los desafíos primordiales es la necesidad de contar con información detallada y confiable sobre aspectos clave como el consumo de recursos, los niveles de productividad, el acceso a insumos naturales y los costos energéticos asociados. Lo cual representa una barrera en territorios caracterizados por ausencia de organización y disponibilidad de datos donde los datos sistematizados, factor común en la mayoría de las unidades de producción campesinas o de pequeños productores (Cruz *et al.*, 2023; Durana *et al.*, 2023). A esto se suma la escasa integración de variables sociales, culturales u organizativas, que son fundamentales en sistemas campesinos. Si bien los modelos energéticos abordan adecuadamente la dimensión biofísica de la sostenibilidad, suelen dejar de lado factores relacionados con las dinámicas familiares, de género o de gobernanza local (Toledo, 2003; Altieri & Nicholls, 2012).

Por otro lado, la complejidad técnica de algunas herramientas representa un obstáculo adicional. Plataformas como EmSim o lenguajes de modelación como Python requieren conocimientos avanzados en matemáticas, programación o análisis de sistemas, lo que limita su uso por parte de profesionales del campo, técnicos de extensión o productores ganaderos (Vigne *et al.*, 2013). Esta barrera tecnológica se acentúa cuando no existen procesos formativos paralelos que faciliten la apropiación de estas metodologías. Finalmente, cabe señalar que muchos modelos han sido diseñados y probados en condiciones experimentales o simuladas, y su validación empírica en contextos reales sigue siendo limitada (Odum (Rotolo *et al.*, 2007). Esto compromete la fiabilidad de sus resultados cuando se aplican directamente sobre sistemas productivos complejos y diversos, lo cual subraya la necesidad de diseñar metodologías más participativas, situadas y empíricamente contrastadas.

Pertinencia contextual y adaptabilidad

Una de las críticas más importantes a los modelos energéticos y emergéticos existentes es su limitada adaptabilidad a la diversidad territorial de los sistemas ganaderos, especialmente en América Latina.

Los contextos rurales presentan una gran heterogeneidad ecológica, social y económica, lo cual demanda enfoques de modelación más flexibles, participativos y sensibles a los saberes locales. Estudios recientes, como los de Durana *et al.* (2023) y Postigo *et al.* (2024), destacan que los procesos de co-creación de modelos con actores del territorio no solo mejoran la pertinencia y aplicabilidad de estas herramientas, sino que además promueven el empoderamiento comunitario y una mayor sostenibilidad sistémica. Frente a esta realidad, la evaluación crítica plantea la urgencia de transitar hacia un nuevo paradigma de modelación ganadera que combine precisión científica con facilidad de uso, enfoque sistémico con anclaje territorial, herramientas computacionales con procesos pedagógicos, y rigor cuantitativo con comprensión socioambiental.

Discusión contextual: modelo adaptado a territorios rurales del Sumapaz

En Cundinamarca (Colombia), se presenta una notable diversidad ecológica y sociocultural, convirtiéndose en un pilar importante estas diferencias para los modelos. En territorios con estas características, los modelos emergéticos sobresalen por su capacidad para integrar de manera sistémica los flujos ecológicos y ofrecer evaluaciones de sostenibilidad con un enfoque integral. No obstante, su aplicación práctica enfrenta retos, ya que requieren datos específicos y detallados.

Por otro lado, los modelos multivariados y los enfoques de simulación participativa presentan una mejor adaptabilidad territorial, dado que permiten incorporar tantas variables biofísicas socioeconómicas y culturales, las cuales facilitan el trabajo e integración con comunidades rurales. Estas metodologías pueden construirse con herramientas estadísticas accesibles (como PCA o análisis clúster) y se prestan para procesos de diagnóstico rápido y co-creación de soluciones. Este tipo de enfoque permitiría valorar no solo la eficiencia energética o el rendimiento productivo, sino también las dinámicas culturales, ecológicas y territoriales que hacen únicos estos sistemas ganaderos rurales.

Propuesta de líneas futuras de modelación energética-emergética en sistemas ganaderos.

A partir del análisis del estado del arte y la evaluación crítica de los modelos existentes, se evidencia la necesidad de avanzar hacia nuevas estrategias metodológicas que permitan modelar los sistemas ganaderos de forma más integral, contextual y útil para la toma de decisiones sostenibles. En este sentido, se proponen cinco líneas de desarrollo para una nueva generación de modelos energéticos y emergéticos con enfoque híbrido, territorial y participativo.

Una de las principales líneas futuras consiste en combinar el análisis emergético con herramientas estadísticas multivariadas, como PCA, análisis clúster y regresión múltiple, para construir modelos que no solo representen los flujos energéticos del sistema,

sino que además permitan identificar tipologías productivas y proyectar escenarios diferenciados, permitiendo de esta manera, identificar relaciones entre eficiencia energética, variables productivas y prácticas de manejo, además de detectar y proponer patrones de sostenibilidad entre grupos de productores.

Se propone el diseño de modelos con enfoque participativo, desarrollados de manera conjunta entre investigadores, técnicos y productores. Esta co-construcción no solo favorece la apropiación social del modelo, sino que garantiza su pertinencia en términos de lenguaje, variables, prioridades territoriales y cultura productiva, por ende se sugiere el diseño de plataformas abiertas, visuales y multilingües, adaptadas a contextos de baja conectividad y con interfaces amigables para técnicos, estudiantes y productores, una opción que de respuesta a ello sería, una versión simplificada de EmSim o la creación de módulos para Excel, R o Python con plantillas precargadas podrían favorecer la adopción de estos modelos a nivel territorial.

CONCLUSIONES

- La presente revisión crítica ha permitido develar, con rigurosidad científica y enfoque transdisciplinario, los vacíos, avances y posibilidades que ofrece la modelación energética y emergética en los sistemas ganaderos bovinos. Más allá de la utilidad técnica de los modelos analizados, este ejercicio representa una interpelación profunda al paradigma dominante de interpretación de la ganadería, invitando a su resignificación desde una lógica ecológica, territorial y epistémicamente plural.
- Uno de los hallazgos más determinantes de esta revisión es que la modelación tradicional -centrada exclusivamente en variables productivas y balances físicos- resulta insuficiente para explicar la complejidad de los sistemas ganaderos, especialmente en territorios de alta diversidad cultural y ecológica como los Andes colombianos. Los modelos de crecimiento animal, los análisis energéticos y los enfoques emergéticos ofrecen herramientas parciales, pero carecen de una arquitectura integradora que articule la dimensión ecológica, socioeconómica, política y simbólica del sistema productivo.
- La modelación emergética aporta una innovación conceptual fundamental al reconocer el valor ambiental oculto en cada unidad de producción; sin embargo, su impacto territorial ha sido limitado por la complejidad técnica, la dependencia de datos difíciles de recolectar en entornos rurales y la falta de traducción sociopedagógica hacia comunidades y actores no especializados. Por su parte, los enfoques multivariados y participativos han demostrado ser más adaptables, pero requieren ser dotados de mayor capacidad predictiva, precisión ecológica y fundamentación energética.
- En este sentido, el futuro de la modelación en ganadería no está en perfeccionar modelos disciplinares, sino en diseñar arquitecturas híbridas, que permitan el diálogo entre saberes, escalas y lenguajes. Modelos que integren el cálculo y la cultura, la simulación y la experiencia, la matemática y el territorio. Modelos que no solo midan la eficiencia o la sostenibilidad, sino que activen procesos de transformación rural, soberanía productiva y justicia ambiental.
- Se plantea entonces una ruptura con la lógica extractiva de los modelos tecnocráticos, proponiendo una modelación relacional, situada, y políticamente consciente. Esta nueva generación de modelos debe ser al mismo tiempo herramienta de análisis, plataforma de aprendizaje y medio para la acción colectiva. En regiones como el Sumapaz, esto es más que una necesidad académica: es un mandato ético.
- Finalmente, este artículo propone una agenda científica ambiciosa y necesaria: avanzar hacia la modelación de sistemas ganaderos como paisajes vivos, entramados ecológicos, económicos y culturales, donde cada flujo de energía, cada variable ambiental y cada decisión productiva esté inscrita en un marco de comprensión holística. Solo así la modelación dejará de ser un ejercicio técnico y se convertirá en un instrumento real de transición agroecológica y de construcción de territorios sostenibles y dignos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, L.F.; DA COSTA, A.M.; SANTOS, M.A.: "Sustentabilidade da pecuária extensiva no Pantanal brasileiro: uma abordagem com base na emergia", *Revista Brasileira de Agroecologia*, 5(2), 25-33, 2010.
- ALTIERI, M.; NICHOLLS, C.I.: "Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable", En: *Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología*, Montevideo: Nordan Comunidad, 2012.
- CRUZ, E.; VILLAMIL, J.; CAMARGO, D.: "Evaluación multivariada de sistemas ganaderos bovinos en Cundinamarca", *Sustainability*, 15(16), 2023, 16093. DOI: <https://doi.org/10.3390/su1516093>
- DURANA, N.; GONZÁLEZ, R.; FRANCO, P.: "Diagnostic and Redesign of Andean Dairy Systems towards Sustainability", *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 2023, 1223184. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1223184>
- GÓMEZ, D.A.; MUÑOZ, L.M.; RODRÍGUEZ, R.F.: "Modelación de las funciones de crecimiento aplicadas a la producción animal", *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 21(3): 50-56, 2008, ISSN: 0120-0690, Publisher: Universidad de Antioquia.
- MOLINA, F.; ROMERO, C.; DÍAZ, L.: "Soil Organic Carbon, Water and Carbon Footprints in High Mountain Livestock Systems", *Sustainability*, 17(3), 11-35, 2025, <https://doi.org/10.3390/su17031135>

- ODUM, H.T.: *Environmental accounting: emergy and environmental decision making*, 1996, ISBN: 0-471-11442-1.
- PERDIGÓN, R.; GONZÁLEZ, R.: “Aplicación de modelos no lineales para evaluar curvas de crecimiento en ganado bovino”, *Pastos y Forrajes*, 43(2), 123-132, 2020.
- POSTIGO, J.; VILLALOBOS, C.; CORTÉS, R.: “Resilience of Paramo Livestock Systems to Climate Variability in the Sumapaz Region”, *Land*, 13(3), 499, 2024, DOI: <https://doi.org/10.3390/land13030499>
- ROTOLO, G.C.; LEMCOFF, J.H.; VIGLIZZO, E.F.: “Evaluación ambiental de sistemas ganaderos de carne mediante análisis de emergía: una aplicación en la Pampa Argentina”, *Agrociencia*, 11(2), 126-134, 2007.
- TEDESCHI, L. O.: “Assessing the adequacy of mathematical models”, *Agricultural Systems*, 82(1), 1-17, 2004, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ag-sy.2003.11.004>
- TOLEDO, V.M.: “La memoria biocultural: la importancia ecológica de las sabidurías tradicionales”, *Revista Interdisciplinaria de Estudios Ambientales*, 1(1): 1-15, 2003.
- VIGNE, M.; MARTIN, G.; DURU, M.: “An emergy-based evaluation of dairy farm sustainability in two contrasting systems in France”, *Ecological Indicators*, 32, 79-87, 2013, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eco-lind.2013.03.013>