

Emergía y Energía en Sistemas de Producción Agropecuarios: Bases Conceptuales

Energy and Energy in Agricultural Production Systems: Conceptual Basis

✉ 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: La termodinámica es crucial para entender y optimizar los procesos agropecuarios, especialmente en el uso de recursos como energía solar, agua y nutrientes. Los conceptos de emergía y exergía son fundamentales para evaluar la eficiencia energética y la sostenibilidad. La emergía mide la energía de un tipo utilizado para generar otro flujo energético, rastreando la "memoria" energética del sistema. La exergía cuantifica el trabajo útil máximo obtenible, reflejando la calidad de la energía. La emergía es una metodología ecológico-termodinámica que valora ambientalmente los flujos de energía, masa y dinero, cuantificando recursos renovables, no renovables y derivados del mercado. Permite visualizar y calcular flujos, determinando índices y facilitando un balance integral de economía, sociedad y medioambiente. Ante la creciente demanda de productos pecuarios, la cuantificación de la energía, en cantidad, calidad y origen, es vital para mejorar la sostenibilidad. Este artículo revisa la teoría y aplicación de la emergía y la exergía en el sector agropecuario, analizando estudios de caso que demuestran su potencial para evaluar y mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad.

Palabras clave: termodinámica, energía solar, eficiencia energética, sostenibilidad.

ABSTRACT: Thermodynamics is crucial for understanding and optimizing agricultural and livestock processes, especially in resource use like solar energy, water, and nutrients. The concepts of energy and exergy are fundamental for assessing energy efficiency and sustainability. Emergy measures the energy of one type used to generate another energy flow, tracking the system's energy "memory." Exergy quantifies the maximum obtainable useful work, reflecting energy quality. Emergy is an ecological-thermodynamic methodology that environmentally values energy, mass, and money flows, quantifying renewable, non-renewable, and market-derived resources. It allows visualizing and calculating flows, determining indices, and facilitating an integrated balance of economy, society, and the environment. Given the increasing demand for livestock products, quantifying energy in quantity, quality, and origin is vital for improving sustainability. This article reviews the theory and application of energy and exergy in the agricultural sector, analyzing case studies that demonstrate their potential to evaluate and improve energy efficiency and sustainability.

Keywords: Thermodynamics, Solar Energy, Energy Efficiency, Sustainability.

INTRODUCCIÓN

Termodinámica, Balance de Energía y Emergía en la Producción Agropecuaria

El balance energético en sistemas agropecuarios se define como el análisis de los flujos y transformaciones de energía dentro de un sistema biológico delimitado (Yepes & Martínez, 2005).

El presente texto identifica las bases conceptuales de la emergía y la exergía en los sistemas de producción

agropecuarios. En el ámbito agrícola, este balance se manifiesta principalmente a través del proceso de fotosíntesis, donde la energía solar incidente es convertida en energía química por los organismos autótrofos (De Jesús et al. 2016). La eficiencia de esta conversión, η fotosíntesis, está condicionada por variables termodinámicas como la temperatura (T) y la disponibilidad hídrica (Ψ_w), y su optimización es crucial para la maximización de la biomasa producida.

Recibido: 14/02/2025

Aceptado: 01/07/2025

Conflict of interests: 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, **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 la producción pecuaria, el balance energético implica la evaluación de la conversión de la energía química contenida en el alimento ingerido en diversas formas de energía, incluyendo calor (Q), trabajo corporal (W) y la energía química almacenada en productos como carne, leche, huevos y biomasa. La eficiencia metabólica, η metabólica, de este proceso se ve afectada por factores como la calidad nutricional del alimento y las condiciones ambientales. Los estudios termodinámicos en sistemas pecuarios buscan optimizar la tasa de conversión de la energía del alimento en productos de valor, minimizando las pérdidas energéticas asociadas a procesos metabólicos.

El concepto de **emergencia** (Em), introducido por Odum (2007), extiende el análisis termodinámico convencional al incorporar la energía solar equivalente requerida directa e indirectamente para generar un flujo o un producto (Brown & Ulgiati, 2013). La emergencia cuantifica la energía total invertida (Etotal) en los procesos productivos, abarcando tanto la energía de los ecosistemas como la energía asociada a los insumos antropogénicos. Este enfoque proporciona una perspectiva holística de la sostenibilidad (S), permitiendo la evaluación del impacto energético incorporado en la producción de alimentos y productos de origen animal. La emergencia se erige como una herramienta fundamental para la evaluación de la eficiencia global (η_{global}) de los sistemas agropecuarios, considerando tanto los flujos energéticos internos como la contribución energética de los recursos externos (Balanta & Nazarit, 2024).

La aplicación de los conceptos de emergencia (Em) y exergía (Ex) Wall (2011) en sistemas de producción animal facilita:

- Evaluación de la sostenibilidad: La emergencia revela la dependencia del sistema de recursos renovables (Eren) y no renovables (Enon-ren), mientras que la exergía cuantifica la eficiencia en la utilización de energía de alta calidad. La investigación contemporánea Zhang et al. (2017); Zhan et al. (2018); Zhao et al. (2018), subrayan una clara orientación hacia el desarrollo sostenible, impulsada significativamente por la evaluación de la emergencia a través de modelos e indicadores específicos. Este enfoque promueve la contabilidad ecológica basada en el ciclo de vida de la riqueza, y las contribuciones teóricas resultantes demuestran el valor de la emergencia como método de valoración en la econtabilidad y los procesos biocontables. En última instancia, esto fomenta la sostenibilidad ecológica al facilitar una comprensión integral de los fenómenos y elementos que componen la riqueza natural, elemento crucial para un desarrollo que armonice la economía con el medio ambiente.
- Identificación de puntos críticos: El análisis de emergencia y exergía puede identificar las etapas del proceso productivo con mayor demanda de recursos y pérdidas de energía, permitiendo la implementación de estrategias de optimización.

- Comparación de sistemas: La cuantificación de la energía en términos de emergencia y exergía permite la comparación de diferentes sistemas de producción agropecuarios en función de su eficiencia (η) y sostenibilidad (S).
- Optimización del uso de recursos: La comprensión de la calidad y el origen de la energía facilita el diseño de estrategias para una utilización más eficiente de los recursos, minimizando el impacto ambiental (I).

El presente artículo se centrará en el análisis de la aplicación de la emergencia en sistemas de producción agropecuarios, resaltando su relevancia para la evaluación de la sostenibilidad, la optimización del uso de recursos y el análisis de estudios de caso orientados a un manejo más eficiente y resiliente de los sistemas productivos.

DESARROLLO DEL TEMA

Fundamentos Teóricos

Este artículo de revisión se fundamenta en una metodología de investigación documental exhaustiva. La estrategia de búsqueda se centró en la identificación y selección de literatura académica relevante en fuentes especializadas. Se emplearon términos clave como "emergencia", "exergía", "sistemas agropecuarios", "agricultura", "ganadería", "eficiencia energética" y "sostenibilidad" para recopilar estudios, libros y artículos que abordaran las bases conceptuales de ambas metodologías y su enfoque en el contexto agropecuario.

La selección de la literatura se realizó mediante la revisión de títulos, resúmenes y, cuando fue necesario, el texto completo, priorizando aquellos trabajos que definieran claramente los principios de la emergencia y la exergía y que discutieran su aplicación conceptual o teórica en sistemas de producción agrícola y pecuaria.

Es de vital relevancia citar el estudio realizado por Martínez & Calderón (2024), los cuales identifican árbol de las tendencias investigativas frente al análisis energético; describe la construcción de un árbol de la ciencia para comprender la evolución de términos y autores relevantes en un método de valoración energético con implicaciones biocontables. Este árbol se basa en el análisis de citaciones, cocurrencia de palabras, concitaciones y acoplamiento bibliográfico. La raíz representa a los autores más influyentes, el tronco las orientaciones del campo, y las hojas las líneas de investigación recientes. La búsqueda de información para este análisis se realizó en 2022 en dos bases de datos, utilizando fórmulas booleanas, cuyos resultados se presentan en el documento.

La síntesis de la información se llevó a cabo mediante la extracción y organización de los conceptos clave, las definiciones fundamentales, las unidades de medida y la forma en que ambas metodologías se entienden y se aplican para analizar la eficiencia y la sostenibilidad en el sector agropecuario. Se buscó identificar las similitudes,

diferencias y la complementariedad de la emergencia y la exergía como herramientas de análisis conceptual en este campo. La presentación de esta síntesis se estructura de manera lógica para exponer primero las bases conceptuales de cada metodología por separado y luego su enfoque particular en los sistemas agropecuarios.

La energía es un ente físico que existe por doquier bajo distintas formas y constituye, junto con la materia, la base de todos los fenómenos que tienen lugar en el universo; es la capacidad que tiene un cuerpo para realizar un trabajo, producir un cambio o transformación. La producción agropecuaria, como sistema complejo, implica una serie de transformaciones energéticas desde las fuentes primarias (luz solar) hasta los productos finales (carne, leche, huevos, biomasa). La termodinámica, ciencia que estudia el calor, el trabajo y las relaciones entre ambos, proporciona un marco conceptual para analizar estos procesos. Sin embargo, para evaluar la sostenibilidad y eficiencia de estos sistemas, es necesario ir más allá de la simple contabilidad energética y considerar la calidad de la energía utilizada. La energía está disponible para los agroecosistemas a partir de dos fuentes fundamentales: la ecológica y la cultural. La energía ecológica es aquella que proviene del sol y de otros recursos naturales e interviene en la producción de energía química a través de la fotosíntesis. La energía cultural es la que suministran los seres humanos a fin de optimizar la producción de biomasa en los agroecosistemas. Existen dos fuentes de energía cultural: la biológica (de origen animal o humano-trabajo animal o humano, estiércol o energía de la biomasa) y la industrial (electricidad, gasolina, petróleo, gas natural, fertilizantes, maquinaria, etc.) (Guadiana *et al.*, 2021).

Los balances energéticos, como sistema de contabilidad de los ingresos y egresos en los procesos de producción de alimentos, son la base para la toma de decisiones acerca de la viabilidad de los costos ambientales de inversión de energía y de rentabilidad económica en la agricultura. Como metodología de estimativo de costos, los balances energéticos son utilizados desde la década del 70 y se han generalizado en los países desarrollados, especialmente en Europa (Yepes & Martínez, 2005). Con el análisis energético se busca cuantificar la demanda de entrada y salida de energía de un determinado sistema, en este caso de un sistema agrario (Neira *et al.*, 2013). Según Taiz & Zeiger (2002); Camejo (2012) citados por Guadiana *et al.* (2021), dado que hay energía disponible en todo lo que es reconocible (incluso información), una energía basada en medidas de emergencia, deletreado con una "m", se puede utilizar para evaluar la riqueza real en una base común pero no se agregan calorías de diferentes tipos (Álvarez *et al.*, 2006). Los sistemas agrícolas se están desarrollando sin una dirección predeterminada. Para reorientar este proceso, es preciso contar con metodologías nuevas de evaluación y diseño de sistemas agrícolas, y colocarlos en una línea de evolución hacia el punto máximo de equilibrio entre los componentes de la sostenibilidad (Valdés *et al.*, 2009).

En concordancia con lo anterior se muestran los siguientes datos en Colombia del estudio realizado en 2024 por UPME-CORPOEMA (2024) donde se revela una falta de centralización en la información energética del sector agropecuario colombiano, con la caña de azúcar como única excepción. Solo cuatro sectores (flores, avícola, acuicultura y porcícola) integran energías renovables. Los sectores son diversos en procesos y tamaños de productores. El sector agropecuario representa el 2,37% del consumo energético nacional, con un 10,9% de ACPM, 4% de gasolina y GLP, y 0,1% de energía eléctrica respecto al total nacional. El 86% del consumo se concentra en pisos cálidos, donde se ubican los principales sectores productivos. El 97,54% de la energía se usa para fuerza motriz, y el 97% del consumo total son combustibles fósiles. La producción primaria agrícola lidera el consumo energético (25 952 TJ/año), seguida por la pecuaria (13 769 TJ/año). El ganado, con 30 millones de cabezas, es el mayor consumidor debido a procesos diarios. Los procesos de cosecha, preparación del terreno, riego y transporte interno son los de mayor consumo en el sector agrícola, mientras que en el pecuario son el transporte y la alimentación. En pesca y acuicultura, la pesca es el proceso de mayor consumo energético.

El análisis energético es fundamental en estudios agrarios para fortalecer la toma de decisiones técnicas y productivas, ofreciendo alternativas con mayores rendimientos energéticos necesarios por el aumento de impactos ambientales (Neira *et al.*, 2013). Para una eficiencia energética trascendente, se requiere un enfoque holístico del sistema agroalimentario. En la agricultura de precisión, la termodinámica y la emergencia optimizan riego y fertilización, mejorando la eficiencia energética e hídrica (De Melo *et al.*, 2017; Zhou & Yan, 2024; Zhou *et al.*, 2018; Odum, 2007; Foley *et al.*, 2011). Similarmente, en la producción pecuaria, estos principios optimizan el bienestar térmico y la eficiencia metabólica Thornton (2010), contribuyendo a la sostenibilidad. La integración del balance energético y la emergencia en un marco termodinámico avanza hacia modelos agropecuarios más sostenibles y eficientes Odum (2007), optimizando el uso de recursos y mitigando impactos ambientales (Godfray *et al.*, 2010; Foley *et al.*, 2011). En conclusión, la aplicación de termodinámica y emergencia mejora la eficiencia y contribuye al desarrollo de modelos de producción más sostenibles y resilientes.

Fundamentos Termodinámicos y su Aplicación en la Producción Animal:

- Primera Ley de la Termodinámica: Conservación de la Energía:
 - Este principio, que postula la invariabilidad de la energía en sistemas cerrados, se traduce en la producción animal en la equivalencia entre la energía ingerida y la energía disipada o retenida.
 - "La primera ley de la termodinámica, o ley de conservación de la energía, establece que la energía no puede ser creada ni destruida, sino sólo transformada de una forma a otra." (Moran *et al.*, 2014).

- En la práctica, esto implica que la energía del alimento se distribuye entre el mantenimiento, el crecimiento y la producción, con pérdidas inevitables por calor y excreción.
- Segunda Ley de la Termodinámica: Entropía y Exergía:
 - La segunda ley introduce el concepto de entropía, que mide el desorden de un sistema, y la exergía, que cuantifica la energía disponible para realizar trabajo útil.
 - "La segunda ley de la termodinámica introduce el concepto de entropía y establece que la entropía de un sistema aislado siempre aumenta para un proceso espontáneo." (Cengel & Boles, 2015).
 - En la producción animal, esto se refleja en la degradación de la exergía del alimento durante la digestión y el metabolismo, con una fracción significativa disipada como calor.
 - El análisis exergético, por tanto, permite evaluar la eficiencia de conversión de la energía del alimento en productos animales, identificando los puntos críticos de pérdida de exergía.
- Termodinámica del No Equilibrio:
 - Los sistemas de producción animal son sistemas abiertos, que intercambian materia y energía con su entorno, y se encuentran en un estado de no equilibrio.
 - La termodinámica del no equilibrio permite comprender los flujos de energía y materia en estos sistemas, así como su estabilidad y resiliencia.
 - La aplicación de esta rama de la termodinámica es fundamental para el diseño de sistemas de producción animal sostenibles, que minimicen el impacto ambiental y maximicen la eficiencia.

Según Campbell & Tilley (2003), "La emergía proporciona una visión holística de la sostenibilidad, al considerar la energía solar incorporada en los procesos de producción". En el sector agropecuario, la emergía permite evaluar la eficiencia en el uso de recursos y el impacto ambiental de las prácticas agrícolas; para entender la importancia de esta herramienta se necesita realizar un abordaje desde sus bases conceptuales hasta su aplicabilidad en los sistemas de producción agropecuaria.

1. El Concepto Fundamental: Transformidades de Emergía (UET)
 - "El emjulio (ej) es la unidad de medida de la emergía, que representa la energía solar equivalente necesaria para generar un flujo de energía" (Odum, 1996, p. 92). Esta unidad permite comparar diferentes formas de energía en una base común, facilitando la evaluación de la sostenibilidad.
 - La base de la medición de emergía radica en las Transformidades de Emergía (UET). Estas transformidades son factores de conversión que permiten expresar diferentes tipos de energía

(fósil, eléctrica, etc.) en una unidad común: la energía solar equivalente (sej). Como lo define Odum (1996), "la transformidad de emergía se define como la cantidad de energía solar equivalente requerida para producir una unidad de energía o materia". Esto significa que cada recurso o producto tiene una "historia energética" que se puede rastrear hasta su origen solar.

- Para realizar un análisis de emergía, es esencial consultar tablas de UET actualizadas. Estas tablas, a menudo disponibles en centros de investigación ambiental, proporcionan los factores de conversión necesarios para diversos recursos y productos.

2. El Proceso de Medición: Análisis de Flujo de Emergía
 - El análisis de flujo de emergía implica la construcción de un diagrama que represente todos los insumos y productos del sistema que se está evaluando. Esto puede incluir desde la energía solar que incide en un campo agrícola, hasta los fertilizantes, pesticidas, combustible y la cosecha final.
 - Una vez que se han identificado todos los flujos, se recopilan datos sobre la cantidad de cada insumo y producto. Por ejemplo, se puede medir la cantidad de fertilizante utilizado en kilogramos o la cantidad de cosecha en toneladas.
 - El siguiente paso es multiplicar la cantidad de cada insumo y producto por su respectiva UET. Esto convierte todas las cantidades a unidades de energía solar equivalente (sej).
 - Finalmente, se suman todos los valores de emergía de los insumos para obtener la emergía total requerida por el sistema. Esto proporciona una medida de la "carga energética" del sistema.

3. Indicadores Específicos para la medición de la Emergía
 - Además de la emergía total, se pueden calcular indicadores específicos para evaluar la sostenibilidad del sistema. Por ejemplo:
 - La Relación de Emergía Renovable (RER) indica la proporción de emergía que proviene de fuentes renovables (Brown & Ulgiati, 2013; Campbell & Tilley, 2003). Este indicador es esencial para evaluar la transición hacia sistemas de producción que minimicen el uso de recursos no renovables (Brown & Ulgiati, 2013; Campbell & Tilley, 2003).
 - El Índice de Sostenibilidad de Emergía (ESI) combina la RER con la relación de carga ambiental para proporcionar una evaluación más completa de la sostenibilidad (Brown & Ulgiati, 2016).
 - La exergía muestra la pérdida de energía útil. En un sistema de riego, no toda la energía eléctrica se convierte en presión de agua; una parte se pierde como calor, ilustrando el aumento de entropía (Wall, 2011).

Aplicaciones Avanzadas de los conceptos Emergencia y Exergía en la Producción Agropecuaria

1. Modelización Termodinámica de Procesos Metabólicos:
 - "La modelización termodinámica permite simular los procesos metabólicos en los animales, lo que facilita la optimización de las dietas y el manejo ambiental" (Thornton & Herrero, 2010).
 - "Estos modelos pueden predecir la eficiencia de conversión del alimento, la producción de calor y la generación de desechos, lo que permite tomar decisiones informadas sobre el manejo de los sistemas de producción" (Kebreab *et al.*, 2016).
2. Análisis de Exergía de Sistemas de Producción:
 - "El análisis de exergía se aplica para evaluar la eficiencia de los sistemas de producción animal en su conjunto, considerando todos los flujos de energía y materia" (Wall, 2011).
 - "Esto permite identificar las oportunidades para mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental, como la recuperación de energía de los desechos y la optimización del uso de recursos" (Eriksson & Nielsen, 2017).
3. Evaluación del Impacto Ambiental mediante Termodinámica:
 - "La termodinámica, en conjunto con otras herramientas como el análisis de ciclo de vida y el análisis de emergencia, permite evaluar el impacto ambiental de los sistemas de producción animal" (Beauchemin *et al.*, 2011).
 - "Esto facilita la identificación de las estrategias para reducir la huella de carbono, el consumo de agua y la generación de contaminantes" (Rotz *et al.*, 2019).

Estudios de Caso que se aproximan a la estimación de la Emergencia

Agostinho *et al.* (2010): este estudio específico analiza la emergencia en la producción de maíz en Brasil, lo que puede proporcionar datos comparativos útiles; aquí se presenta el cálculo de la emergencia para una tonelada de maíz producida en una finca de 10 hectáreas. Se define el sistema incluyendo sus límites y componentes como suelo, agua, semillas, fertilizantes, maquinaria, combustible y transporte. Se identifican los flujos de energía de entrada, que comprenden luz solar (100 GJ), precipitaciones (500 m³), fertilizantes (5 toneladas), combustible (1000 litros), semillas (1 tonelada) y trabajo de maquinaria (50 horas). Posteriormente, se realiza la conversión de estas entradas a emulios utilizando los factores de transformación correspondientes.

El segundo ejemplo ilustra el cálculo de la emergencia para la producción de 1000 litros de leche en una granja con 50 vacas lecheras. El sistema se define por sus límites y componentes, que incluyen pastos, agua, alimento concentrado, maquinaria de ordeño,

refrigeración y transporte. Los flujos de energía de entrada identificados son pastos (20 toneladas), agua (10,000 litros), alimento concentrado (5 toneladas), electricidad (500 kWh) y transporte (100 km). Estos insumos son luego convertidos a emulios utilizando sus respectivos factores de transformación para calcular la emergencia total invertida (ETI). Adicionalmente, se calcula la emergencia del producto (ETP) para los 1000 litros de leche y la relación de eficiencia emergética (RE).

CONCLUSIONES

- El análisis del árbol de tendencias investigativas revela una evolución significativa en la comprensión y aplicación de la emergencia. Desde la relación con la transformidad energética y la auto-organización de sistemas, hasta una aplicación más concreta en la evaluación de la carga ambiental y la sustentabilidad.
- La aplicación de principios termodinámicos, fundamentados en los conceptos de emergencia y exergía, establecen una herramienta para evaluar integralmente la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas de producción agropecuaria. En comparación de los enfoques tradicionales donde se centran únicamente en la cantidad de energía, estos modelos permiten incorporar la calidad, el origen y la trayectoria energética de los recursos utilizados, proporcionando una visión completa y equilibrada del desempeño productivo.
- Se evidencia que el análisis emergético aporta una mirada integral de los procesos productivos, al considerar toda la energía directa e indirecta involucrada. Esta forma de medición ayuda a identificar la dependencia de recursos externos y la carga energética oculta en los sistemas de producción. La exergía, por su parte, permite valorar la eficiencia con la que los sistemas transforman esa energía en trabajo útil, revelando los puntos críticos de pérdida y degradación energética.
- Los estudios de caso presentados en este trabajo, tanto en contextos agrícolas (producción de maíz) como pecuarios (producción de leche), constituyen ejemplos simplificados que evidencian la aplicabilidad y el valor analítico de estos métodos. Las diferencias en la Relación de Eficiencia Emergética (RE) entre ambos sistemas muestran la necesidad de adaptar estrategias según el tipo de producción, priorizando siempre la optimización del uso energético y la reducción de impactos ambientales.
- En un contexto de crisis climática y creciente demanda de alimentos, contar con métodos que integren la dimensión ecológica y energética de la producción resulta fundamental.

- El análisis de emergía y exergía en la evaluación de sistemas agropecuarios puede ser clave para diseñar modelos más eficientes, resilientes y ambientalmente responsables, haciéndose necesario, además, fortalecer el uso de estas herramientas en el ámbito académico, técnico y político, y ampliar su aplicación a diversas escalas territoriales y productivas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOSTINHO, F.: "Emergy assessment of maize production in Brazil". *Journal of Cleaner Production*, 18(16-17), 1645-1653, 2010.
- ÁLVAREZ, S.; LOMAS, P.L.; MARTÍN, B.; RODRÍGUEZ, M.; MONTES, C.: "La Síntesis Emergética ("Emergy Synthesis"): Integrando energía, ecología y economía", *Publicaciones de la Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez para los espacios naturales*, 2, 2006.
- BALANTA, V. J.; NAZARIT, D.: "La emergía como método de valoración que contribuye a los procesos biocontables en el marco de la ecocontabilidad: una revisión literaria". *Revista Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas -FACCEA*, 14(1), 44-62, 2024.
- BEAUCHEMIN, K.A.; JANZEN, H.H.; LITTLE, S.M.; MCALLISTER, T.A.; MCGINN, S.M.: "Mitigation of greenhouse gas emissions from beef cattle feedlots in Canada". *Journal of Animal Science*, 89(12), 4325-4342, 2011.
- BROWN, M.T.; ULCIATI, S.: "Emergy analysis for environmental accounting". In *Encyclopedia of Energy, Natural Resources, and Environmental Management* 1-13. 2013.
- BROWN, M.T., ULCIATI, S.: *Emergy synthesis and environmental decision-making*, CRC press, 2016.
- CAMPBELL, D.E.; TILLEY, D.R.: "Emergy analysis of dairy farm systems", *Ecological Modelling*, 161(3), 225-242, 2003.
- CENGEL, Y.A.; BOLES, M.A.: *Thermodynamics: an engineering approach*, McGraw-Hill Education, 2015.
- DE JESÚS, T.; ARAYA, F.; CASTRO, G.; OBANDO, J. M.: "Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: producción más limpia y eficiencia energética", *Tecnología en Marcha*, 29(5), 46-56, 2016.
- DE MELO, C. A: "Agricultural water management: Efficiency and sustainability", *Journal of Agricultural Sciences*, 35(4), 245-259, 2017.
- ERIKSSON, O.; NIELSEN, P.H.: "Exergy analysis of wastewater treatment systems: A review". *Water Research*, 123, 788-800, 2017.
- FOLEY, J.A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K.; CASSIDY, E.S.; GERBER, J.S.; JOHNSTON, M.; MUELLER, N.D.; O'CONNELL, C.; RAY, D.K.; WEST, P.C.: "Solutions for a cultivated planet", *Nature*, 478(7369): 337-342, 2011, ISSN: 0028-0836.
- GAUGHAN, J.; BONNER, S.; LOXTON, I.; MADER, T.; LISLE, A.; LAWRENCE, R.: "Effect of shade on body temperature and performance of feedlot steers", *Journal of animal science*, 88(12): 4056-4067, 2010, ISSN: 0021-8812.
- GODFRAY, H.; BEDDINGTON, J.R.; CRUTE, I.; HADDAD, L.; LAWRENCE, D.; MUIR, J.F.; PRETTY, J.; ROBINSON, S.; THOMAS, S.; TOULMIN, C.: "Food security: the challenge of feeding 9 billion people", *science*, 327(5967): 812-818, 2010, ISSN: 0036-8075.
- GUADIANA, Z.A.; DURÁN, H.M.; ROSSEL, E.D.; ALGARA, M.; CISNEROS, R.: "Eficiencia energética en sistemas agrícolas familiares bajo condiciones de clima controlado", *Interciencia*, 46(1): 32-36, 2021, ISSN: 0378-1844.
- KEBREAB, E.; STRATHE, A.B.; DIJKSTRA, J.: "Invited review: Greenhouse gas emissions from dairy cows: Sources, drivers, and potential mitigation strategies", *Journal of Dairy Science*, 99(4), 2499-2513, 2016.
- MARTINEZ, B.V.J.; CALDERÓN, D.N.: "La emergía como método de valoración que contribuye a los procesos biocontables en el marco de la ecocontabilidad: Una revisión literaria", *Revista Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas-FACCEA*, 14(1): 44-62, 2024, ISSN: 2539-4703.
- MORAN, M.J.; SHAPIRO, H.N.; BOETTNER, D.D.; DEWITT, J.W.: *Fundamentals of engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons, 2014.
- NEIRA, D.P.; MONTIEL, M.S., FERNÁNDEZ, X.S.: "Energy analysis of organic farming in Andalusia (Spain)", *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 37(2), 231-256, 2013.
- ODUM, H. T.: *Environment, power, and society for the twenty-first century: The hierarchy of energy*. Columbia University Press, 2007.
- ODUM, H.T.: *Environmental accounting: energy and environmental decision making*, 1996, ISBN: 0-471-11442-1.
- ROTZ, C.A.; MONTES, F.; CHIANESE, D. S.: "Environmental footprint of beef cattle production in the United States: II. Regional variation". *Agricultural Systems*, 173, 1-10, 2019.
- THORNTON, P.K.: "Livestock production: Recent trends, future prospects", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2853-2867, 2010.
- THORNTON, P.K.; HERRERO, M.: "Climate change and livestock research for development", *Agricultural Systems*, 103(9), 630-641, 2010.
- UPME-CORPOEMA: *Caracterización del consumo final de energía en los sectores agropecuario y agroindustrial, identificando los principales usos, equipos o tecnologías y energéticos; como insumo para la formulación de las estrategias y medidas de eficiencia energética*, 2024. <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/Biblioteca.aspx>

- VALDÉS, N.; PÉREZ, D.; MÁRQUEZ, M.: ANGARICA, L.; VARGAS, D.: “Funcionamiento y balance energético en agroecosistemas diversos”, *Cultivos Tropicales*, 30(2), 36-42, 2009.
- WALL, G.: “Exergy: A useful concept within resource accounting” *Exergy, An International Journal*, 1(3), 145-153, 2011.
- YEPES, G.; MARTÍNEZ, E.: “Los balances energéticos en la producción agropecuaria”, *Energética*, 33, 73-90, 2005.
- ZHAN, J.; ZHANG, F.; CHU, X.; LIU, W.; ZHANG, Y.: “Ecosystem services assessment based on emergy accounting in Chongming Island, Eastern China”, *Ecological Indicators*, 105: 464-473, Publisher: Elsevier, 2018, ISSN: 1470-160X, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.015>
- ZHANG, J.; FU, Y.-C.; SHI, W.-L.; GUO, W.-X.: “A method for estimating watershed restoration feasibility under different treatment levels”, *Water Science and Technology: Water Supply*, 17(5): 1232-1240, 2017, ISSN: 1606-9749, DOI: <https://doi.org/10.2166/ws.2017.017>
- ZHOU, J.; YAN, S.: “A comprehensive review of corn ethanol fuel production: from agricultural cultivation to energy application”, *Journal of Energy Bioscience*, 15, 2024, ISSN: 1925-1963.