MODELO EMERGÉTICO PARA EVALUAR LA TRANSICIÓN DE SISTEMAS PRODUCTIVOS AGRÍCOLAS EN ZONAS SUBANDINAS: DE MONOCULTIVO A AGROFORESTAL

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

MAESTRÍA EN DESARROLLO SUSTENTABLE Y GESTIÓN AMBIENTAL

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

TESIS DE GRADO

MARÍA ALEJANDRA CABEZAS FAJARDO

DIRECTORA: DIANA DEL SOCORRO DAZA ARDILA

BOGOTÁ D.C.
2025

El esfuerzo detrás de este trabajo está dedicado a mi papá y mi mamá, quienes me apoyaron cada día y me brindaron las herramientas necesarias para crecer personal y profesionalmente. Gracias por confiar siempre en mí y por ser el pilar principal que sostiene cada uno de mis logros y proyectos.
Los amo profundamente.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo de investigación y que, de múltiples formas, acompañaron mi proceso académico y personal a lo largo de la maestría.

En primer lugar, doy gracias a Dios, por ser guía constante, por sostenerme con serenidad en los momentos difíciles y por fortalecer mi espíritu con esperanza y claridad.

A mis padres, cuyo amor incondicional, ejemplo constante de compromiso, honestidad, y apoyo permanente han sido fundamentales para mi crecimiento profesional. A mis hermanos, por su apoyo constante y firme.

Mi directora de tesis, la profe Diana, fue fundamental en este proceso gracias a su acompañamiento riguroso, claridad conceptual y disposición permanente para orientar este proyecto con profundidad, precisión y sentido crítico. Su guía fue determinante para alcanzar cada uno de los objetivos planteados. Gracias por confiar en mi trabajo.

A la Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental, a su equipo académico y administrativo, gracias por su compromiso, por responder siempre con paciencia cada una de mis inquietudes, y por brindar un espacio formativo exigente y humano. A los docentes que guiaron los seminarios de investigación, por su acompañamiento durante todas las fases del proceso, sus observaciones oportunas y su impulso metodológico comprometido con la producción de conocimiento.

A mis amigas más cercanas, quienes, con sus gestos de ánimo, su alegría, escucha y cariño genuino, en los momentos más difíciles, me acompañaron siempre.

Finalmente, a todas las personas que, desde distintos escenarios, reconocieron en mí el entusiasmo y la dedicación con que asumí este proceso, gracias por caminar a mi lado.

Tabla de contenido

Resumen **5**
1. INTRODUCCIÓN **6**
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA **7**
3. JUSTIFICACIÓN **8**
4. OBJETIVOS **10**
4.1. GENERAL 10
4.2. ESPECÍFICOS 10
5. MARCO TEÓRICO **10**
Antecedentes 10
Caracterización de las Regiones Subandinas en Colombia 13
Sistemas Agroforestales (SAF) 17
Cultivos convencionales 19
Cultivos intercalados 19
La Emergía 20
Índices emergéticos para la evaluación de la sostenibilidad 21
Teoría de sistemas en sistemas productivos 23
6. METODOLOGÍA **25**
6.1. FASE 1: Estudio Cienciométrico 25
Definición de criterios de inclusión y exclusión 26
Clasificación de la información 27
Análisis y Visualización de los datos recopilados 28
6.2. FASE 2: Diseño del modelo matemático emergético 29
6.2.1. Transformación de categorías conceptuales en variables operativas 29
6.2.2. Selección de zonas representativas para la modelación para las variables de clima y suelo 31
6.2.3. Recolección de datos y estructura de variables 32
6.2.4. Modelación matemática de SAF y MON con ajuste según condiciones ecológicas 44
6.2.5. Conversión de flujos a energía solar equivalente (seJ) 46
6.2.6. Cálculo de los Índices de Sostenibilidad Emergética (ICSE) 47
6.3. FASE 3: Formulación de una estrategia de transición basada en ICSE y teoría de sistemas 48
7. RESULTADOS **49**
8. DISCUSIÓN **56**
9. CONCLUSIONES **67**
RECOMENDACIONES FUTURAS **68**
BIBLIOGRAFÍA **69**

Resumen

Esta investigación evalúa la sostenibilidad emergética de la transición de sistemas productivos agrícolas basados en monocultivo hacia sistemas agroforestales (SAF) en zonas subandinas de Colombia. A través del diseño de un modelo matemático emergético, se integraron variables ecológicas, productivas y económicas para simular el comportamiento de cuatro sistemas (monocultivo de café, maíz, frijol y SAF mixto) y calcular sus flujos energéticos en energía solar equivalente (seJ). La metodología incorporó factores de ajuste basados en condiciones climáticas y edáficas, como precipitación, materia orgánica y capacidad de retención de agua, permitiendo una representación más realista de la eficiencia productiva de cada sistema.

Los resultados revelan que el SAF supera consistentemente a los sistemas de monocultivo en todos los Índices Clave de Sostenibilidad Emergética (ICSE), especialmente en el porcentaje de recursos renovables (%R) y el Índice de Sostenibilidad Emergética (ESI), lo que confirma su menor dependencia de insumos externos y mayor eficiencia ecológica. Asimismo, los diagramas de Sankey visualizan las diferencias en estructura metabólica y flujos energéticos, destacando la capacidad del SAF para reintegrar materia orgánica y reducir la carga ambiental.

Finalmente, se propuso un algoritmo lógico-condicional basado en los ICSE, orientado a guiar decisiones de transición agrícola. La tesis se enmarca en la línea de investigación en Ambiente y Sustentabilidad de la Maestría, contribuyendo al desarrollo de herramientas analíticas replicables para la evaluación sistémica de agroecosistemas. Se concluye que los SAF representan una estrategia viable y cuantificablemente superior para mejorar la sostenibilidad agrícola en territorios subandinos.

1. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad de los sistemas productivos agrícolas en regiones subandinas enfrenta desafíos significativos derivados del predominio de prácticas convencionales como el monocultivo, el uso intensivo de agroquímicos y la fragmentación de paisajes ecológicos. Estas prácticas han provocado la degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad y una creciente presión sobre los recursos naturales, comprometiendo la estabilidad ecológica y económica de estas zonas (Illescas et al., 2020; Ferreira et al., 2010).

En este contexto, los sistemas agroforestales (SAF) han sido promovidos como una alternativa viable que integra la producción agrícola con la conservación de servicios ecosistémicos, aumentando la resiliencia de los ecosistemas agrícolas y mejorando el uso eficiente de insumos (Casanova et al., 2014; Akinnifesi et al., 2010). Sin embargo, la transición hacia estos modelos requiere herramientas analíticas rigurosas que permitan cuantificar su sostenibilidad de forma comparativa frente a sistemas convencionales, bajo condiciones climáticas y edáficas reales.

El análisis emergético, propuesto inicialmente por Odum (1996) y desarrollado por Brown y Ulgiati (2004), ofrece un marco metodológico robusto para este propósito. Esta metodología permite evaluar la sostenibilidad mediante la cuantificación de flujos de energía, recursos renovables y no ‘renovables, y su integración en índices que reflejan la eficiencia y la presión ambiental de los sistemas. Aunque ampliamente utilizado en contextos tropicales y templados, su aplicación en ecosistemas de transición como los bosques subandinos ha sido escasa, lo cual limita la generación de estrategias contextualizadas y adaptativas en el manejo agrícola (Giannetti et al., 2006; Zhao et al., 2005).

La presente investigación se enmarca en la línea de investigación de *Sistemas de producción y Sustentabilidad* de la Maestría, en tanto busca generar conocimiento aplicado sobre herramientas cuantitativas para la transición agroecológica en contextos frágiles y biodiversos. El objetivo central consistió en diseñar un modelo matemático emergético que permita comparar el desempeño sostenibilidad de monocultivos convencionales frente a un sistema agroforestal mixto, en función de flujos energéticos y condiciones ecológicas locales. Este modelo integra tanto insumos productivos como variables climáticas y edáficas, considerando su influencia en la eficiencia del sistema. A través del cálculo de los Índices Clave de Sostenibilidad Emergética (ICSE) y la simulación de diferentes escenarios, se proponen bases sólidas para orientar estrategias de transición agrícola en regiones subandinas, con énfasis en la cuantificación energética, la reducción de insumos externos y el fortalecimiento de la resiliencia agroecológica.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La producción agrícola, como actividad económica fundamental a nivel global, desempeña un papel crucial en la alimentación tanto humana como animal. Sin embargo, la agricultura intensiva, caracterizada por el uso desmedido de agroquímicos y la expansión de la frontera agrícola, han generado graves consecuencias, como la fragmentación del hábitat, la pérdida de biodiversidad y la degradación del suelo (Porter *et al*., 2013; Illescas *et al.,* 2020). Estas prácticas no solo comprometen la salud de los ecosistemas, sino también la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas productivos, acentuando la necesidad de adoptar enfoques más sostenibles que integren la conservación de los recursos naturales (Ferreira *et al*., 2010). En respuesta, se han promovido prácticas agrícolas sostenibles, como los sistemas agroforestales (SAF), los cuales integran enfoques ecosistémicos orientados a preservar la biodiversidad, mejorar la resiliencia de los ecosistemas y maximizar los servicios ecosistémicos de provisión (PNUMA, 2015).

En este contexto, la transición hacia prácticas más sostenibles requiere herramientas de evaluación que permitan cuantificar los impactos energéticos y ambientales de diferentes sistemas agrícolas. La emergía es un enfoque de análisis sistémico que permite evaluar la sostenibilidad de los sistemas productivos mediante la cuantificación de los flujos de materia, energía y recursos, al traducir todos los insumos en términos de energía solar equivalente (Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 2004). Este enfoque combina principios de la ecología de sistemas con una metodología cuantitativa, y ofrece una perspectiva integral para comparar diferentes sistemas de producción en función de su renovabilidad, eficiencia emergética y carga ambiental (Illescas et al., 2020). No obstante, la aplicabilidad de la emergía en entornos específicos presenta limitaciones importantes. En particular, las regiones subandinas, caracterizadas por sus ecosistemas de transición entre zonas montañosas y llanuras, requieren de estudios emergéticos que respondan a sus condiciones particulares, incluyendo factores climáticos y edáficos únicos (Tinoco et al., 2014; Pérez, 2002; CAR, 2020).

En el contexto de los bosques subandinos, que se caracterizan por ser sucesionales o secundarios, ubicados generalmente entre los 1,000 y 2,400 metros sobre el nivel del mar y con temperaturas medias anuales entre 18 y 24 °C (Pérez, 2002), la fragmentación del hábitat ha sido especialmente severa debido a su idoneidad para la agricultura y la ganadería (Cuatrecasas, 1989; Rudas et al., 2007). Este tipo de ecosistema ofrece una oportunidad única para la implementación de sistemas agroforestales (SAF) que combinen cultivos como café (*Coffea arabica*), maíz (*Zea mays*) y frijol (*Phaseolus vulgaris*) en un esquema de cultivo intercalado, aportando detalles a la comparación de la sostenibilidad de sistemas agroforestales frente a monocultivos tradicionales en esta región. Aunque los SAF han sido reconocidos como prácticas sostenibles (Ferreira et al., 2010), existe una falta de estudios que cuantifiquen en estos contextos específicos el uso de recursos renovables y no renovables y la eficiencia energética en términos de sostenibilidad emergética. Esta transición hacia sistemas agroforestales se perfila como una solución prometedora para equilibrar la producción agrícola con la conservación ambiental, mediante la integración de cultivos y árboles que optimicen el uso de recursos naturales (Akinnifesi et al., 2010).

La falta de estudios aplicados a regiones y ecosistemas específicos se traduce en la dificultad de adaptar los resultados obtenidos en un ecosistema a otros con características climáticas y edáficas diferentes, subestimando factores cruciales como el tipo de suelo y la disponibilidad de recursos hídricos (Brown & Ulgiati, 2004). Algunos autores destacan que las diferencias ecológicas y regionales pueden alterar significativamente los resultados del análisis emergético, afectando los flujos de energía, materia y los servicios ecosistémicos que estos sistemas proveen (Lecorre *et al.,* 2015). En este sentido, Zhao et al. (2005) y Campbell (2004) destacan que la concentración de estudios emergéticos en ecosistemas tropicales limita la aplicabilidad de los modelos en otras regiones, como los ecosistemas subandinos.

El reto actual es desarrollar un modelo que, mediante la modelación matemática, facilite la comparación entre sistemas agroforestales y monocultivos convencionales en términos de eficiencia emergética, uso de recursos renovables y no renovables, y carga ambiental en cultivos intercalados en Regiones subandinas. La capacidad de simulación de herramientas como el modelo matemático subraya su relevancia para planificar estrategias sostenibles adaptadas a diversos contextos agroecológicos (Akinnifesi *et al.,* 2010). Esto no solo permitirá evaluar el impacto emergético y ambiental de los sistemas agrícolas, sino también proyectar escenarios futuros para optimizar la gestión de los recursos naturales y garantizar la resiliencia de los sistemas productivos (Muñoz Valerio *et al.,* 2024).

A partir de lo anterior, se formula el siguiente cuestionamiento que indaga en la problemática planteada:

¿Cómo sustentan los índices de sostenibilidad emergética (ICSE) la transición de monocultivo a sistemas agroforestales intercalados en regiones subandinas, evidenciando ventajas en términos de renovabilidad, carga ambiental y eficiencia emergética?

3. JUSTIFICACIÓN

La transición de sistemas de monocultivo a sistemas agroforestales (SAF) representa una oportunidad crítica para avanzar hacia prácticas agrícolas sostenibles, especialmente en regiones subandinas, donde la presión sobre los ecosistemas ha aumentado debido a la expansión agrícola y el uso intensivo de agroquímicos (Porter et al., 2013; Illescas et al., 2020). La degradación de suelos y la fragmentación de hábitats causada por estos sistemas convencionales no solo disminuyen la biodiversidad, sino que también comprometen la sostenibilidad productiva a largo plazo (Ferreira et al., 2010). Dada la vulnerabilidad ambiental de estas zonas de transición ecológica, resulta prioritario explorar sistemas de producción que optimicen el uso de recursos naturales y ofrezcan beneficios tanto ambientales como productivos, como es el caso de los SAF intercalados (Akinnifesi et al., 2010).

La emergía, en este sentido, proporciona un enfoque integral para evaluar la sostenibilidad, pues permite cuantificar los flujos de energía y materiales, así como traducir estos recursos en una unidad de energía solar equivalente, facilitando la comparación entre sistemas agrícolas diversos (Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 2004). Este análisis resulta particularmente relevante en regiones subandinas, donde las condiciones climáticas y edáficas, como la disponibilidad limitada de agua

y las temperaturas moderadas, requieren de estrategias de manejo que prioricen la eficiencia y renovabilidad de los recursos (Pérez, 2002; CAR, 2020). Sin embargo, la falta de estudios aplicados en estos contextos específicos limita la comprensión de los beneficios potenciales de los SAF, especialmente en términos de flujos de energía y la optimización del uso de materiales (Zhao et al., 2005; Campbell, 2004). Cabe precisar que el presente estudio no aborda el ecosistema subandino en su totalidad, sino que se enfoca en ciertas características ambientales y productivas representativas de algunas zonas de Cundinamarca, departamento ubicado dentro de este rango ecológico y con amplia actividad agrícola. Este enfoque localizado se justifica, además, considerando que los ecosistemas subandinos abarcan el 9,15 % del territorio colombiano (IDEAM, 2017), por lo que resulta metodológicamente pertinente acotar el análisis a áreas donde se pueda contar con datos verificables y aplicabilidad territorial.

La presente investigación es relevante y novedosa por su enfoque en el uso de índices clave de sostenibilidad emergética (ICSE) como herramienta de evaluación para fundamentar la transición de monocultivo a sistemas agroforestales en regiones subandinas. Los ICSE, tales como el Índice de Rendimiento Emergético (EYR), el Índice de Carga Ambiental (ELR) y el Índice de Sostenibilidad Emergética (ESI), brindan una base cuantitativa que permite evaluar los beneficios ecológicos de los SAF en relación con los monocultivos (Illescas et al., 2020; Lecorre et al., 2015). Al evaluar indicadores específicos de sostenibilidad, se busca conocer en detalle la eficiencia energética y el impacto ambiental de cada sistema, proporcionando evidencia técnica que sustente el cambio hacia SAF intercalados como alternativa viable y ambientalmente responsable (Muñoz Valerio et al., 2024).

Además, el uso de modelación matemática ofrece la posibilidad de simular escenarios y predecir el desempeño de los SAF y monocultivos bajo condiciones específicas de la región subandina (Akinnifesi et al., 2010). Esta capacidad de simulación es fundamental para proyectar estrategias de manejo que optimicen la resiliencia de los sistemas agroforestales y su capacidad de adaptación a cambios ambientales, lo que resulta crucial en un contexto de cambio climático. Al abordar los impactos futuros de cada sistema en términos de eficiencia emergética, carga ambiental y uso de recursos renovables, la modelación matemática facilitará la adopción de estrategias de sostenibilidad informadas y adaptadas a las condiciones particulares de la región. En el contexto colombiano, donde la información disponible sobre SAF y emergía aplicada en regiones subandinas es aún limitada, el presente estudio contribuye a ampliar el conocimiento técnico y territorial disponible, con énfasis en las condiciones productivas y ambientales más representativas.

Este estudio no solo responde a la necesidad de entender y mejorar la sostenibilidad de los sistemas agroforestales en entornos específicos, sino que también contribuye a ampliar el alcance del análisis emergético en regiones poco exploradas, proporcionando bases sólidas para el diseño de sistemas agrícolas más sostenibles y adaptados a los desafíos medioambientales de las regiones subandinas (Brown & Ulgiati, 2004; Lecorre et al., 2015). La implementación de los SAF intercalados puede, además, servir como modelo replicable para otros sistemas de producción en zonas montañosas de características similares, favoreciendo la conservación del ecosistema y la sostenibilidad de los sistemas productivos.

4. OBJETIVOS

4.1.GENERAL

Evaluar la sostenibilidad de la transición entre sistemas productivos (Monocultivo convencional a Sistema agroforestal) en un paisaje subandino mediante un modelo matemático basado en los Índices Clave de Sostenibilidad Emergética (ICSE).

4.2.ESPECÍFICOS

4.2.1. Establecer las categorías de análisis de los flujos de energía, materia y servicios ecosistémicos de provisión, mediante un estudio cienciométrico que fundamente el análisis comparativo de los agroecosistemas en una región subandina.

4.2.2. Diseñar el modelo matemático emergético que simule los flujos de energía, materia y servicios ecosistémicos de provisión, mediante el cálculo de los Indicadores Clave de Sostenibilidad Emergética (ICSE) para comparar el sistema agroforestal y el monocultivo convencional.

4.2.3. Formular una estrategia basada en los principios de la teoría de sistemas y los Índices Clave de Sostenibilidad Emergética (ICSE), que sustente la transición de monocultivos a sistemas agroforestales intercalados en regiones subandinas.

5. MARCO TEÓRICO

Antecedentes

Con el fin de estructurar la propuesta de investigación se toman de referencia diversos autores que han abordado la agroforestería desde múltiples enfoques, explorando su comportamiento en distintos contextos y evaluando su impacto en la sostenibilidad agrícola.

En primer lugar, se parte de Fernández, *et.al*. (2015) quienes en su artículo "*Estado de los elementos químicos esenciales en suelos de los sistemas natural, agroforestal y monocultivo*" presentan una investigación que analiza el estado de los suelos en sistemas naturales, agroforestales y de monocultivo en el municipio de Huatusco, Veracruz. Su estudio se enfoca en comparar las propiedades físicas y químicas del suelo en diferentes sistemas de producción, con el objetivo de evaluar la eficiencia nutrimental de los suelos y su capacidad para mantener o incrementar la fertilidad. Los autores encontraron diferencias significativas en las propiedades físicas y químicas de los suelos estudiados. Por ejemplo, se observaron variaciones en la densidad aparente, la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, la materia orgánica, los niveles de nitrógeno inorgánico y total, fósforo, bases intercambiables, pH y la capacidad de intercambio catiónico entre los sistemas analizados. Como conclusiones, el sistema de producción de café a pleno sol presentó densidades aparentes y texturas similares a los sistemas naturales y agroforestales con árboles de café, pero con una menor capacidad de retención de agua. Por otro

lado, el bosque de niebla mostró los valores más altos para estas propiedades. Los sistemas agroforestales y de café tradicional tuvieron valores intermedios. De esta forma se evidencia la importancia de los sistemas agroforestales en la conservación y mejora de las propiedades del suelo, destacando su potencial para mantener la fertilidad y promover la captura de carbono y fijación de nitrógeno en comparación con los monocultivos.

Entrando en contexto con el modelo matemático, Stewart et al. (2022), en su artículo titulado "*Digital Tools for Quantifying the Natural Capital Benefits of Agroforestry: A Review*", revisan diversas herramientas digitales para cuantificar los beneficios del capital natural en sistemas agroforestales. Los autores concluyen que no existe una herramienta única que cubra todos los aspectos necesarios, pero destacan un conjunto de herramientas, entre ellas FullCAM, InVEST, LUCI y ARIES, que, en combinación, pueden ofrecer una evaluación más completa. Evaluaron estas herramientas en ocho temas clave: producción de madera y captura de carbono, producción agrícola, pastos y ganado, microclima y efectos de refugio, calidad del aire y contaminación, erosión, escorrentía e inundaciones, biodiversidad, polinización y amenidad y recreación. Sin embargo, se requiere una considerable cantidad de datos para su parametrización y su aplicación a gran escala puede ser compleja. Aunque es poderosa en el modelado de interacciones biológicas y físicas en sistemas agroforestales, su implementación demanda una cuidadosa calibración y validación, lo que puede ser un desafío en entornos con datos limitados.

Lo anterior complementado con Burgess *et al*. (2019), en su capítulo titulado "Modelling Agroforestry Systems" del libro *Agroforestry for Sustainable Agriculture***,** exploran el estado actual de los modelos agroforestales y su aplicación para mejorar la sostenibilidad de estos sistemas. Revisan diferentes tipos de modelos, desde empíricos hasta mecanicistas, y destacan herramientas como Yield-SAFE, Hi-sAFe, y WaNuLCAS, que permiten simular las interacciones complejas entre árboles, cultivos y animales en diversas escalas. A pesar de las limitaciones relacionadas con la disponibilidad de datos y la complejidad de modelar estos sistemas, los autores enfatizan la utilidad de estos modelos para evaluar los impactos biológicos y económicos de la agroforestería en comparación con otros usos de la tierra. Además, integran la simulación de impactos económicos y de biodiversidad, proporcionando una visión más holística del potencial de la agroforestería.

Otros autores que exploran en la modelación de sistemas agroforestales son Smethurst *et al.* (2017) en su artículo "*Accurate crop yield predictions from modelling tree-crop interactions in gliricidia-maize agroforestry*", esta investigación mostró que las simulaciones no solo reflejaron con precisión el rendimiento del maíz bajo diferentes configuraciones agroforestales en Kenia y Malawi, sino que también capturaron de manera efectiva las dinámicas de contenido de agua en el suelo a lo largo del tiempo. Estos hallazgos son significativos, ya que indican que el modelo puede ser una herramienta confiable para predecir el impacto de la competencia entre árboles y cultivos en diversos contextos agroecológicos, proporcionando una base sólida para el manejo sostenible de estos sistemas.

Además, en el artículo de Luedeling *et al.* (2016) titulado "*Modelling tree-crop interactions in agroforestry systems: current status and future prospects*", se profundiza en la competencia entre las raíces de árboles y cultivos, un aspecto crítico en la gestión de sistemas agroforestales. Los autores discuten cómo el modelado preciso de estas interacciones subterráneas es esencial para predecir los resultados a largo plazo de la agroforestería, especialmente en términos de sostenibilidad del suelo y eficiencia en el uso del agua. La investigación también pone de relieve las limitaciones actuales de los modelos existentes, como la necesidad de mejorar la representación de la dinámica de nutrientes y de incluir una mayor diversidad de especies de árboles y cultivos en las simulaciones. Estas mejoras podrían ampliar significativamente la aplicabilidad de los modelos en diferentes contextos globales, permitiendo a los investigadores y agricultores optimizar los sistemas agroforestales de manera más eficaz.

Rodríguez y Sánchez (2010) en su trabajo titulado *"Valoración emergética en sistemas agroecológicos de la zona centro"*, presentan una evaluación emergética de los agroecosistemas del Valle del Cauca, que resulta fundamental para la formulación de estrategias sostenibles en sistemas agrícolas. Los autores emplean indicadores como el Índice de Carga Ambiental (ELR) y el porcentaje de renovabilidad (%R), lo cual permite cuantificar de manera efectiva el uso de recursos renovables frente a no renovables, y medir la sostenibilidad de estos sistemas. El estudio utiliza la Metodología MESMIS, que es un marco de análisis para evaluar la sustentabilidad de los agroecosistemas, enfocándose en los flujos de energía, recursos y servicios ecosistémicos, así como en la relación socioambiental del sistema productivo. Esta metodología evalúa la capacidad de los agroecosistemas para mantener su productividad y resiliencia en el tiempo, identificando puntos críticos para mejorar la sostenibilidad. Este enfoque emergético, centrado en los flujos de energía y la eficiencia del uso de recursos, es especialmente relevante para el diseño de un modelo matemático que evalúe la sostenibilidad comparativa entre agroecosistemas

Suca Apaza et al. (2012), en su trabajo titulado *"Sostenibilidad ambiental del sistema de producción de café orgánico en la región Junín"*, realizan una evaluación emergética del sistema de producción de café orgánico, enfocándose en los flujos de energía y recursos naturales. A través del análisis emergético, los autores cuantifican el uso de recursos renovables y no renovables en el sistema de producción de café, aplicando indicadores clave como la transformidad, la renovabilidad y la tasa de eficiencia emergética (EYR). Los resultados muestran que el sistema es ambientalmente sostenible, con una renovabilidad del 34,28% y una tasa de carga ambiental (ELR) de 1,92, lo que indica un uso eficiente de los recursos. La metodología empleada incluye la caracterización detallada de los flujos energéticos del sistema, organizados en subsistemas de producción, poscosecha y beneficio húmedo, lo que permite un análisis sistémico integral. Este enfoque emergético proporciona una estructura sólida para evaluar la sostenibilidad de sistemas agrícolas.

Finalmente, en el trabajo de Akinnifesi et al. (2010) "*Fertilizer trees for sustainable food security in the maize-based production systems of east and southern Africa: a review*", se resalta cómo la agroforestería modelada puede desempeñar un papel crucial en la mejora de la seguridad alimentaria en regiones vulnerables. Los autores describen cómo la integración de árboles

fertilizantes, como *Gliricidia sepium*, en los campos de maíz ha demostrado aumentar significativamente los rendimientos de los cultivos en zonas donde los nutrientes del suelo y el agua son limitantes. La capacidad exploración mediante simulaciones de estos sistemas complejos ofrece a los agricultores una herramienta poderosa para predecir los beneficios potenciales de la agroforestería, reduciendo el riesgo asociado con la adopción de nuevas prácticas agrícolas y promoviendo la resiliencia a largo plazo en los sistemas de producción agrícola.

Caracterización de las Regiones Subandinas en Colombia

Los bosques subandinos constituyen ecosistemas estratégicos que se localizan en regiones montañosas con rangos altitudinales comprendidos entre los 1.000 y 2.400 metros sobre el nivel del mar, definición adoptada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam, 2017) y respaldada por Velásquez, Maniguaje y Duque (2012). Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam, 2017), basados en la clasificación climática Caldas-Lang, estos ecosistemas abarcan aproximadamente 10.483.075,9 hectáreas, lo que representa el 9,15% del territorio colombiano (Figura 1). Esta clasificación toma en cuenta variables como la temperatura y precipitación para diferenciar claramente dos tipologías: el bosque subandino seco y el bosque subandino húmedo.

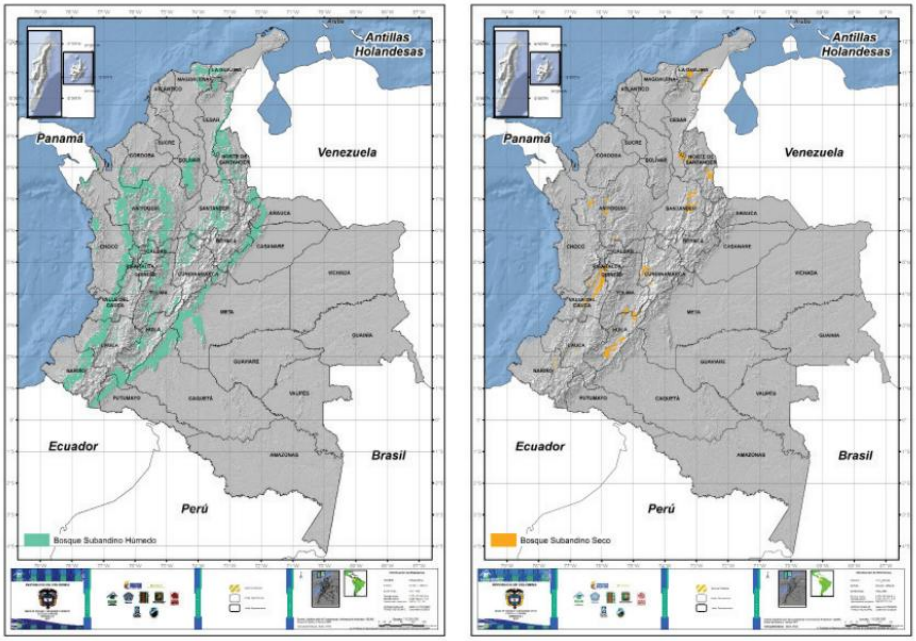


Figura 1. Distribución del territorio nacional del ecosistema bosque subandino. A. Bosque subandino húmedo; B. Bosque subandino seco. Tomado de: Instituto de Hidrología, Metereologpia y Estudios Ambientales (Ideam), 2017

El bosque subandino seco se desarrolla en regiones templadas semiáridas, con precipitaciones moderadas que fluctúan en rangos del factor Lang entre 40,1 y 60,1, generando una vegetación adaptada a condiciones de menor humedad y una estructura vegetal menos compleja (Ideam, 2017). En contraste, el bosque subandino húmedo se ubica en regiones templadas caracterizadas por condiciones de humedad más elevadas, clasificadas dentro de las provincias climáticas húmedas, semihúmedas y superhúmedas, con factores Lang superiores a 60,1. Estas condiciones propician

una vegetación más diversa, exuberante y estructuralmente compleja, favoreciendo especialmente la abundancia de plantas epífitas, como musgos, helechos y orquídeas, cuya presencia depende estrechamente de la humedad atmosférica (CVC, 2003).

La estructura del bosque subandino húmedo está compuesta por árboles con alturas promedio entre 20 y 25 metros, aunque se encuentran ejemplares emergentes que pueden superar los 50 metros, destacando especies emblemáticas como las palmas de cera (CVC, 2003). Esta diversidad estructural contribuye a sostener una riqueza significativa de especies vegetales y animales, especialmente aves e insectos, esenciales para procesos ecológicos como la polinización y dispersión de semillas (Velásquez, Maniguaje & Duque, 2012).

En términos geográficos, estos bosques se distribuyen en las vertientes orientales y occidentales de las cordilleras colombianas, destacando regiones clave en el departamento de Cundinamarca como los cerros orientales y zonas importantes del corredor Sumapaz-Guerrero (Ideam, 2017). Estos bosques desempeñan un papel fundamental al sostener una alta biodiversidad y ofrecer servicios ecosistémicos críticos, como la regulación hídrica, que garantiza la sostenibilidad de actividades agrícolas y abastece el recurso hídrico para consumo humano (Rivera, García & Franco, 2018).

Sin embargo, diversas presiones antrópicas como la expansión agrícola, la urbanización acelerada, prácticas ganaderas no sostenibles y minería ilegal han generado procesos significativos de fragmentación y degradación de estos bosques (Rudas et al., 2007). Dichas intervenciones afectan negativamente la biodiversidad y reducen considerablemente la capacidad de resiliencia de estos ecosistemas frente a perturbaciones ambientales.

Por ello, resulta fundamental implementar estrategias integrales orientadas a la conservación y recuperación del bosque subandino húmedo. Estas estrategias incluyen el establecimiento y manejo efectivo de áreas protegidas, la implementación de sistemas agroforestales sostenibles y el fomento de mecanismos comunitarios participativos para la conservación ambiental, que garanticen la sostenibilidad ecológica y socioeconómica de estos valiosos ecosistemas (Rudas et al., 2007).

Agricultura en Regiones Subandinas de Colombia

Las regiones subandinas de Cundinamarca presentan una destacada vocación agrícola, enmarcada en una amplia diversidad de cultivos permanentes y transitorios que responden a las condiciones edafoclimáticas de cada provincia. Esta producción, en muchos casos, articula elementos tradicionales con procesos de modernización agroindustrial (Instituto Humboldt, 2007). Los sistemas agrícolas en estas zonas representan no solo una base económica esencial, sino también una fuente de presión sobre la biodiversidad, por lo cual se hace necesaria su evaluación y gestión sostenible (CAR, 2020). A continuación se resumen los principales cultivos reportados y aspectos relevantes del sistema productivo de cada región:

Bajo Magdalena: Los cultivos transitorios presentan una baja diversificación, con predominancia del maíz (50%) y el frijol (33,33%), mientras que entre los cultivos permanentes destacan la yuca (33,33%), el café y la caña panelera (Terridata-DNP, 2016, citado en Gobernación de

Cundinamarca, 2017) La vocación agropecuaria de esta zona es tradicional, pero enfrenta desafíos relacionados con el uso intensivo del suelo y la fragmentación de hábitats naturales.

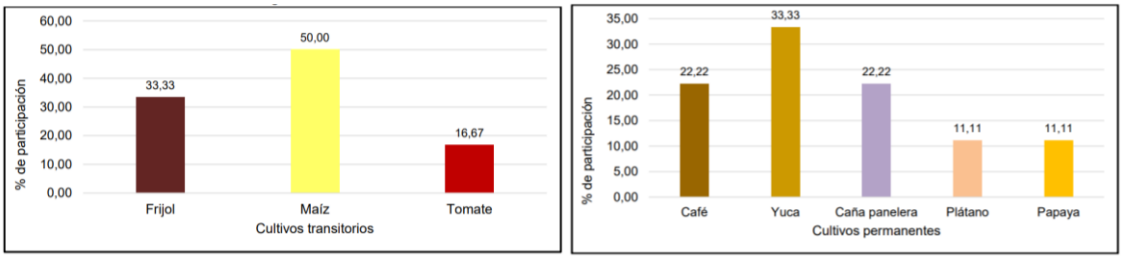


Figura 2. Cultivos transitorios y permanentes de la provincia de Bajo Magdalena. Tomado de: (CAR, 2020).

Magdalena Centro: Esta provincia muestra una producción más diversificada. El maíz es el cultivo transitorio con mayor participación (31,58%), seguido por el frijol, tomate y habichuela. En el caso de los cultivos permanentes, la caña panelera lidera con un 28,57%, seguida por el banano y el café, ambos con 23,81% de participación (Gobernación de Cundinamarca, 2017). Esta configuración agrícola evidencia una articulación con prácticas agroindustriales, así como potencial para cadenas productivas sostenibles.

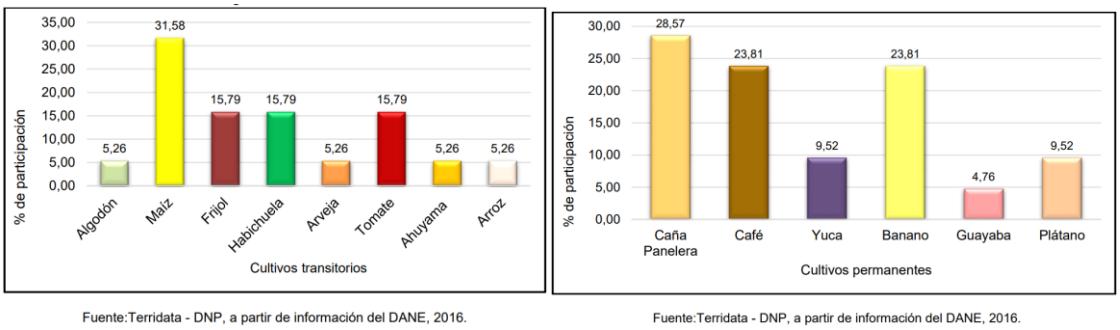


Figura 3. Cultivos transitorios y permanentes de la provincia de Magdalena centro. (CAR, 2020).

Gualivá: En Gualivá, los cultivos permanentes incluyen café (22,22%), yuca (33,33%) y caña panelera (22,22%), mientras que los transitorios están representados por tomate, arveja y maíz (Gobernación de Cundinamarca, 2017). Esta zona reporta una de las mayores producciones de caña panelera en el departamento, con más de 81.000 toneladas anuales, lo cual la convierte en un nodo agroindustrial clave para este producto.

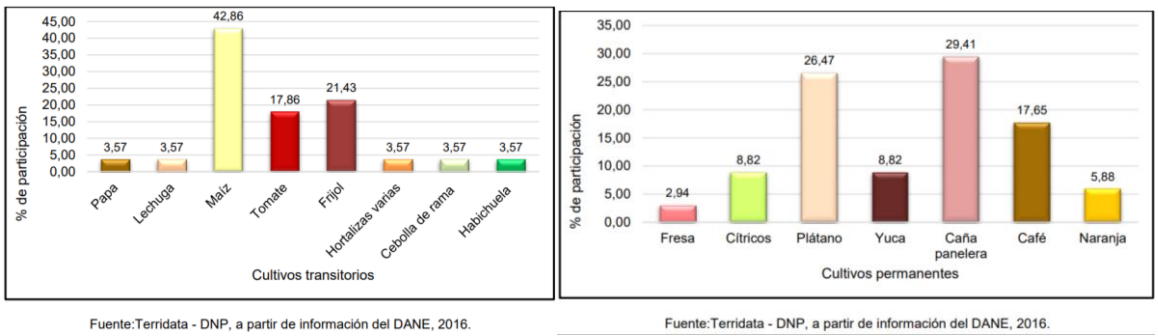
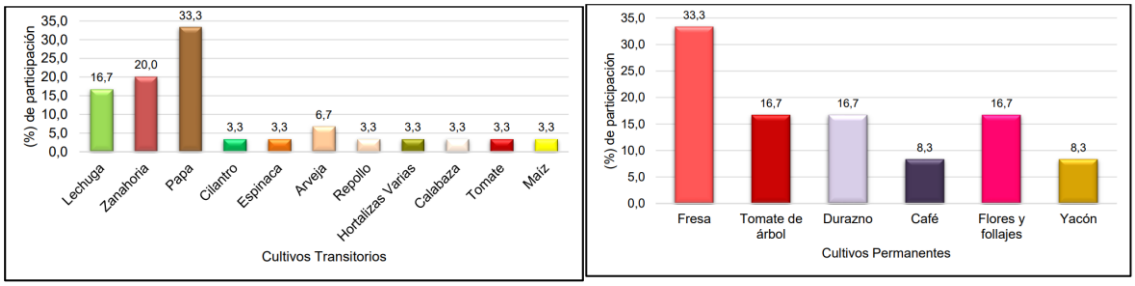


Figura 4. Cultivos transitorios y permanentes de la provincia de Gualivá. Tomado de: (CAR, 2020).

Sabana Occidente: La Sabana Occidente se destaca como una zona especializada en floricultura, lo que le confiere un perfil agroexportador y de alta tecnificación. A su vez, se cultivan hortalizas, cebolla de bulbo, arveja, entre otros productos de ciclo corto, los cuales se ven favorecidos por la cercanía a Bogotá y la infraestructura logística existente (CAR, 2020; Gobernación de Cundinamarca, 2017)

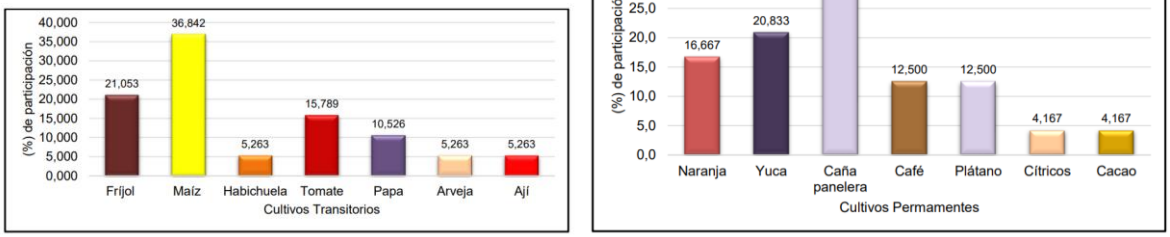


Fuente:Terridata - DNP, a partir de información del DANE, 2016.

Fuente:Terridata - DNP, a partir de información del DANE, 2016.

Figura 5. Cultivos transitorios y permanentes de la provincia de Sabana Occidente. Tomado de: (CAR, 2020).

Rionegro: En la provincia de Rionegro predominan cultivos permanentes como café, caña panelera y yuca, con una alta concentración de pequeñas unidades productivas. Se observa también una participación significativa del frijol, papa y maíz, como cultivos transitorios. Esta zona combina producción de alimentos de autoconsumo con excedentes para comercialización regional (CAR, 2020)

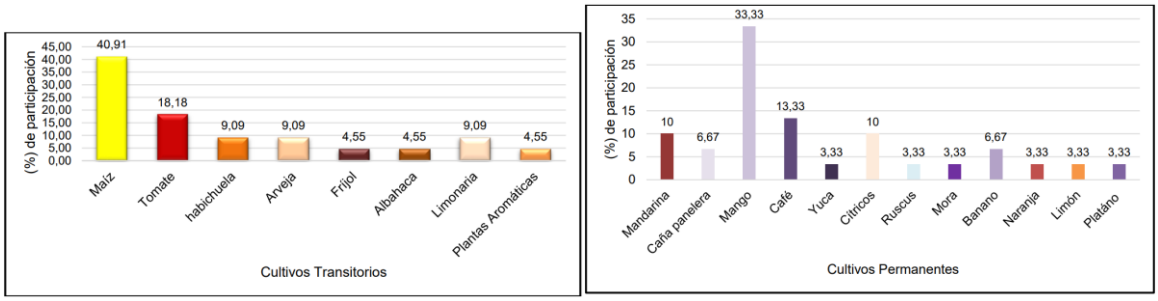


Fuente:Terridata - DNP, a partir de información del DANE, 2016.

Fuente:Terridata - DNP, a partir de información del DANE, 2016.

Figura 6. Cultivos transitorios y permanentes de la provincia de Rionegro. Tomado de: (CAR, 2020).

Tequendama: La provincia del Tequendama presenta un panorama agrícola mixto, donde se destacan cultivos permanentes como el café, la caña panelera, la fresa y el tomate de árbol. Entre los transitorios sobresalen la papa, el maíz y la arveja. Estas actividades agrícolas están íntimamente ligadas al turismo rural y al mercado de productos frescos, aprovechando su proximidad con centros urbanos como Fusagasugá y La Mesa (CAR, 2020; Terridata-DNP, 2016)



Fuente:Terridata - DNP, a partir de información del DANE, 2016.

Fuente:Terridata - DNP, a partir de información del DANE, 2016.

Figura 7. Cultivos transitorios y permanentes de la provincia de Tequendama. Tomado de: (CAR, 2020).

Sistemas Agroforestales (SAF)

La agroforestería, o modelos agroforestales, se caracterizan por la combinación de árboles o arbustos con cultivos agrícolas y/o ganado en un mismo terreno, mediante diversas formas de ordenamiento (ONF, 2013). La aplicación de la agroforestería permite la producción de alimentos para consumo humano, como carne, frutas y hortalizas, así como forraje para animales. La integración de árboles o especies leñosas con actividades agropecuarias en los Modelos Agroforestales más comunes ofrece la oportunidad de equilibrar la productividad del suelo con la conservación de los recursos naturales del área, incluyendo suelo, agua, fauna silvestre, animales domésticos y cultivos agrícolas (Altieri, 1999). Es esencial seleccionar las especies más adecuadas para el entorno, elegir el momento óptimo para la plantación y siembra, y planificar el uso de los animales de manera adecuada, todo ello combinado con un ordenamiento apropiado para lograr los mejores resultados (INFOR, 2008).

Pereira *et.al.* (2011) describe que la Agroforestería promueve interacciones beneficiosas entre ellos para alcanzar la sostenibilidad a largo plazo. Al combinar estos elementos, se aprovechan las sinergias naturales para mejorar la productividad del suelo y los recursos disponibles. Este enfoque es particularmente valioso en áreas con tierras de calidad marginal y escasos insumos, donde se busca aumentar la producción de manera sostenible. Al mejorar las relaciones entre los componentes del sistema y utilizar eficientemente los recursos naturales como el espacio, el suelo, el agua y la luz, los sistemas agroforestales pueden generar mayores rendimientos que los sistemas agrícolas convencionales (Thomas y Cancio, 2013). Esta adaptabilidad y capacidad de mejora en la productividad los hacen especialmente adecuados para pequeños agricultores en regiones tropicales y subtropicales, donde los recursos son limitados y las tecnologías modernas pueden ser inaccesibles. La Agroforestería, al integrar prácticas tradicionales con conceptos modernos de gestión de recursos, ofrece una solución efectiva y sostenible para promover la seguridad alimentaria y el desarrollo rural (Farfán, 2014).

Los sistemas agroforestales que integran el cultivo del café junto con una variedad de prácticas asociadas representan un valioso recurso técnico para los productores de café en Colombia. Es fundamental que estos modelos agroforestales estén enfocados en la conservación de los recursos

naturales, los flujos de energía y la conservación de la materia, además de promover un incremento sostenible en la producción, lo que contribuirá a garantizar la viabilidad económica y social de las familias cafeteras en Colombia (CENICAFÉ, 2021). Farfán (2020) describe que los sistemas agroforestales con café se consideran sistemas complejos debido a la interacción dinámica entre sus numerosos componentes. Estos sistemas se caracterizan por tener propiedades emergentes que no pueden explicarse por las partes individuales, y su comprensión requiere no solo conocer el funcionamiento de las partes, sino también cómo interactúan entre sí (Ver **figura 1**). Son dinámicos y están influenciados por su entorno, con una tendencia al bajo rendimiento con el tiempo. La interdependencia entre los componentes, la organización y la función definida por procesos de entrada y salida son características fundamentales.

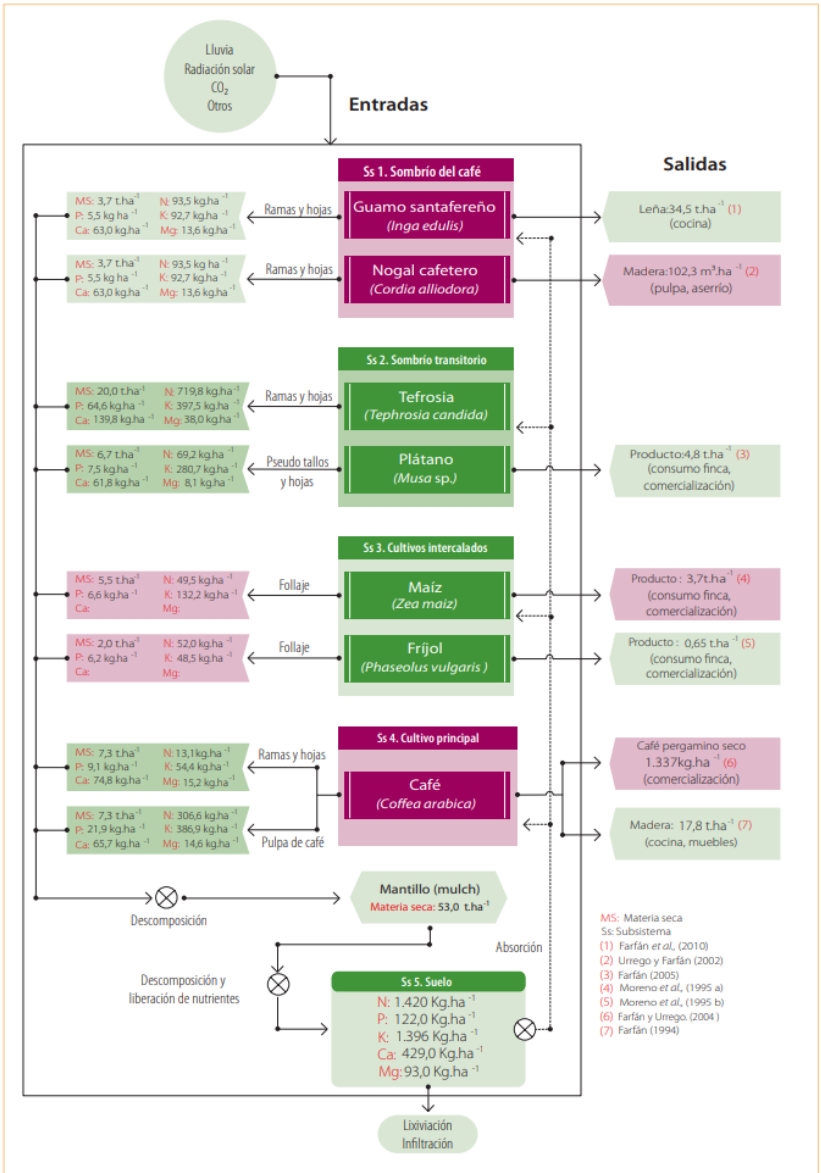


Figura 1. Diagrama de flujo del sistema agroforestal con café, como sistema complejo. Tomado de: CENICAFÉ y Farfán (2014)

En SAF, la biomasa total se estima mediante mediciones de campo de variables como altura total, diámetro a la altura del pecho (DAP) y uso de modelos alométricos que relacionan estas medidas con la biomasa seca (Marín et al., 2016; Ibáñez, 2022). Al incluir especies arbóreas y frutales, presentan una biomasa total significativamente mayor que los monocultivos, lo que contribuye a un mayor almacenamiento de carbono y servicios ecosistémicos (CIFOR, 2022; López et al., 2016). Además, la biomasa debajo del suelo representa aproximadamente el 17% del total, lo que también es relevante para la captura de carbono y la fertilidad del suelo (López et al., 2016).

Cultivos convencionales

La agricultura convencional moderna, caracterizada principalmente por el uso extensivo de insumos agroquímicos y la implementación del monocultivo, ha generado serios problemas ecológicos y socioeconómicos. Estas prácticas, en su afán de maximizar la productividad a corto plazo, han contribuido significativamente a la degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad, y el agotamiento de recursos hídricos (Rosset, 1997). A pesar de los incrementos iniciales en rendimiento que proporcionaron los agroquímicos y la mecanización, en muchos casos, se ha observado una disminución en la eficiencia del uso de fertilizantes y pesticidas, lo que ha llevado a un ciclo continuo de dependencia de insumos externos (Altieri & Nicholls, 2007). Además, la concentración en un solo cultivo promueve la vulnerabilidad a plagas y enfermedades, incrementando la necesidad de agroquímicos, lo que genera una espiral de degradación ambiental y aumento de costos de producción (Rosset, 1997). Ante esta situación, la agroecología se ha propuesto como una alternativa sostenible, donde la diversificación de cultivos y el manejo orgánico del suelo emergen como pilares fundamentales para restaurar la funcionalidad del agroecosistema, reduciendo la dependencia de insumos externos y promoviendo la resiliencia de los sistemas agrícolas (Altieri & Nicholls, 2007).

Cultivos intercalados

El sistema de cultivos intercalados se caracteriza por la plantación de dos o más especies en el mismo espacio de manera simultánea, lo que permite optimizar el uso de recursos naturales como la luz, el agua y los nutrientes (Albino-Garduño et al., 2015). Esta estrategia se basa en la complementariedad de las especies, donde sus diferentes requerimientos fisiológicos y morfológicos minimizan la competencia y fomentan una mayor eficiencia en la absorción de recursos del suelo y el aprovechamiento de la radiación solar (Willey, 1990; Johanne & Lynch, 2012). Los cultivos intercalados ofrecen beneficios significativos en términos de sostenibilidad ambiental y productividad agrícola. Albino-Garduño et al. (2015) demuestran que el sistema intercalado de maíz y frijol incrementa el rendimiento de ambos cultivos en comparación con sistemas monoculturales, debido a la eficiente distribución de raíces y la captura de radiación solar en el dosel. Este diseño permite que el maíz, al poseer raíces más profundas, acceda a nutrientes en estratos inferiores del suelo, mientras que el frijol, con raíces superficiales, utiliza eficientemente los nutrientes de las capas superiores, evitando la competencia directa (Johanne & Lynch, 2012; Hamdollah, 2012).

Asimismo, el enfoque de cultivos intercalados minimiza la necesidad de fertilizantes y riego, reduciendo el impacto ambiental al maximizar los rendimientos con menor uso de insumos. Investigaciones sobre sistemas agroforestales templados con cultivos de cereales y árboles maderables destacan que la interacción entre especies no solo mejora la productividad, sino también la resiliencia del sistema ante variaciones climáticas, al mantener un microclima estable en la parcela (Alfonzo-Lopez et al., 2017). Este sistema de cultivo también puede aumentar la eficiencia relativa de la tierra (ERT), un indicador que evalúa la capacidad de los cultivos intercalados para superar el rendimiento de cultivos individuales en la misma área. Los valores de ERT mayores a uno reflejan un mejor aprovechamiento del espacio y de los recursos disponibles en los sistemas intercalados, lo que demuestra su potencial para mejorar la sostenibilidad y la producción de alimentos en entornos agrícolas diversos (Malézieux et al., 2009; Cortés et al., 2008).

La Emergía

El análisis emergético, desarrollado por Howard T. Odum en la década de 1980, es un enfoque integral que cuantifica los flujos de energía en los sistemas ecológicos y productivos, usando como unidad de medida la energía solar equivalente (seJ). Este método permite evaluar la sostenibilidad de los sistemas al medir la cantidad de energía directa e indirecta utilizada para generar productos o servicios dentro de un sistema específico (Odum, 1996). La base del análisis emergético radica en la premisa de que todos los recursos, ya sean renovables o no renovables, se pueden transformar en una única unidad de valor energético, lo que facilita la comparación entre sistemas productivos de diferente naturaleza (Brown & Ulgiati, 2004).

Según Martínez (2017), en el análisis emergético, la conversión de energía en recursos naturales a emergía se realiza mediante factores de transformidad específicos para cada tipo de insumo. Para la radiación solar directa, que es fundamental en los sistemas agrícolas y agroforestales, se emplea una transformidad estándar de 1.0 seJ/J, aplicable también a otros recursos renovables básicos. La energía contenida en el agua de lluvia, en particular, se convierte utilizando una transformidad de $1.82\ x\ 10^4 seJ/J$, valor ajustado para ecosistemas donde el agua representa un recurso clave. Para nutrientes y biomasa en los cultivos, se aplican transformidades específicas basadas en estudios de agroecosistemas tropicales, las cuales permiten una cuantificación precisa del valor energético acumulado en estos insumos, ofreciendo un marco de evaluación robusto para analizar la sostenibilidad en sistemas productivos complejos (Casanova *et al.*, 2014). Estas transformidades facilitan la cuantificación del aporte energético de cada insumo y son esenciales para estudios en los que se busca un balance preciso de sostenibilidad emergética en sistemas productivos, como sugiere Tittonell (2019) en el contexto de la transición agroecológica.

Siguiendo lo descrito por Torres *et.al.* (2019) este enfoque no solo permite comprender cómo los flujos de energía se integran en los sistemas productivos, sino también evaluarlos a través de una serie de Índices clave de la sostenibilidad emergética (ICSE). Estos índices permiten medir diversos

aspectos de la sostenibilidad, como la dependencia de recursos renovables, la presión ambiental ejercida, y la eficiencia energética global.

Índices emergéticos para la evaluación de la sostenibilidad

Los Índices emergéticos son herramientas fundamentales para evaluar la sostenibilidad de los sistemas productivos, ya que permiten cuantificar el uso de recursos renovables y no renovables en función de su impacto en el entorno. Odhum (1996) destaca índices como la transformidad y el Índice de Sostenibilidad Emergética (ESI), que miden el uso eficiente de los recursos en un sistema. Estos Índices permiten comparar la sostenibilidad de diferentes sistemas agrícolas mediante el cálculo de la cantidad de emergía invertida en la producción de bienes o servicios, y son esenciales para desarrollar metodologías que consideren tanto el impacto ambiental como la capacidad del sistema para renovarse (Zhao et al., 2005). Asimismo, Giannetti et al. (2006) y Brown & Ulgiati (2004) destacan Índices como el Environmental Loading Ratio (ELR) y el Emergy Yield Ratio (EYR), que facilitan la cuantificación de la proporción de recursos renovables y no renovables en un sistema, representándolos gráficamente en diagramas ternarios para evaluar mejor la sostenibilidad.

A continuación, se explican los principales índices utilizados en el análisis emergético, fundamentales para evaluar y comparar la sostenibilidad de los sistemas agroecológicos:

Renovabilidad (R%)

La renovabilidad se refiere a la proporción de energía que proviene de recursos renovables en comparación con la energía total utilizada en un sistema. Un alto valor de R% indica que el sistema depende mayormente de recursos renovables, lo cual es un indicador positivo de sostenibilidad. En cambio, un valor bajo sugiere una alta dependencia de recursos no renovables, lo que incrementa la presión ambiental y reduce la viabilidad del sistema a largo plazo. Según Pulselli et al. (2011), la renovabilidad es uno de los Índices clave para evaluar la sostenibilidad agroecológica, ya que mide de manera efectiva la capacidad de un sistema para depender de insumos renovables.

$$\%R = \frac{Energia\ de\ recursos\ renovables}{Emergia\ total}\ x\ 100$$

(Pulselli et al., 2011; Giannetti et al., 2006).

Transformidad

La transformidad mide la cantidad de energía solar equivalente requerida para generar una unidad de energía en un producto. Este índice expresa el valor de los productos en términos energéticos, considerando las transformaciones sucesivas que la energía ha experimentado dentro del sistema. Un valor alto de transformidad indica que el producto ha pasado por múltiples procesos energéticos, lo que lo hace más costoso en términos de emergía (Odum, 1996).

$$T = \frac{Emergía\ (seJ)}{Energía\ disponible\ o\ producto\ (J)}$$

(Odum, 1996; Zhao et al., 2005; Brown & Ulgiati, 2004).

Índice de Rendimiento Emergético (EYR)

El EYR mide la eficiencia de un sistema al calcular la relación entre la emergía total utilizada en el sistema y la emergía aportada por insumos externos. Un valor alto de EYR sugiere que el sistema es eficiente en la utilización de recursos renovables, en lugar de depender de insumos externos, lo que lo hace más sostenible (Brown & Ulgiati, 2004).

$$EYR = \frac{Emergía\ Total}{Emergía\ de\ insumos\ externos}$$

(Brown & Ulgiati, 2004; Giannetti et al., 2006).

Índice de Carga Ambiental (ELR)

El ELR evalúa la presión ambiental que ejerce un sistema sobre su entorno, calculando la relación entre los recursos no renovables y los renovables utilizados en el sistema. Un valor bajo de ELR indica una menor carga ambiental y una mayor sostenibilidad del sistema. Ulgiati et al. (1995) destacan que el ELR es crucial para identificar los sistemas que dependen en gran medida de insumos no renovables y que, por lo tanto, tienen un mayor impacto ambiental.

$$ELR = \frac{Emergía\ de\ recursos\ no\ renovables}{Emergía\ de\ recursos\ renovables}$$

(Ulgiati et al., 1995; Brown & Ulgiati, 2004).

Razón de Inversión Emergética (EIR)

El EIR mide la cantidad de insumos no renovables necesarios en relación con la emergía renovable usada en un sistema. Un valor alto de EIR **(> 1)** indica que el sistema depende significativamente de insumos externos no renovables, lo que disminuye su sostenibilidad. Un EIR bajo **(< 1)** por el contrario, sugiere que el sistema utiliza más recursos renovables locales, lo que lo hace más sostenible y menos dependiente de fuentes externas (Brown & Ulgiati, 2004).

$$EIR = \frac{Emergía\ de\ insumos\ no\ renovables\ o\ externos}{Emergía\ de\ recursos\ renovables}$$

(Brown & Ulgiati, 2004; Giannetti et al., 2006).

Índice de Sostenibilidad Emergética (ESI)

El **ESI** integra tanto la eficiencia energética como la carga ambiental, ofreciendo una medida global de la sostenibilidad de un sistema. Un valor alto de **ESI** indica un sistema productivo que equilibra la eficiencia energética con un bajo impacto ambiental, lo que refleja una mayor sostenibilidad. Este índice es particularmente útil para comparar la sostenibilidad entre diferentes sistemas productivos, como los monocultivos y los agroecosistemas mixtos (Brown & Ulgiati, 2004).

$$ESI = \frac{EYR}{ELR}$$

(Brown & Ulgiati, 2004; Rodríguez Salcedo & Sánchez de Praguer, 2010; Pulselli et al., 2011).

El análisis emergético permite evaluar el uso de energía en un sistema y facilita la comparación entre diferentes sistemas productivos, como los agroforestales y los monocultivos. Al medir los flujos de energía solar equivalente, se puede determinar cuál es más eficiente y sostenible. Esto resulta crucial para planificar sistemas agrícolas que equilibren la producción y la conservación ambiental. (Pulselli et al., 2011).

Teoría de sistemas en sistemas productivos

La teoría de sistemas es una herramienta fundamental en el análisis de los sistemas productivos, particularmente en la agricultura, donde los componentes biofísicos, económicos y sociales se interrelacionan de forma compleja (Altieri, 1999; Gliessman, 2007). Desde su formulación en la década de 1940, este enfoque ha evolucionado significativamente, permitiendo el estudio de los sistemas productivos mediante la identificación de sus componentes y sus interacciones, y ha demostrado ser fundamental para analizar la sostenibilidad y el impacto ambiental de los agroecosistemas (Casanova-Pérez et al., 2015). En el contexto agroecológico, esta teoría ofrece una base conceptual sólida para comprender cómo los elementos de los agroecosistemas —suelo, agua, plantas y animales— funcionan de manera interdependiente, generando flujos de materia y energía que permiten su sustentabilidad y resiliencia (García-Barrios et al., 2021). Esta perspectiva holística y estructurada ha facilitado el análisis de los agroecosistemas como sistemas dinámicos, en los cuales los factores internos y externos interactúan constantemente, afectando los flujos de recursos y, en última instancia, la productividad y sostenibilidad del sistema. En este sentido, la teoría de sistemas proporciona un marco epistemológico para el estudio de las complejidades socioambientales dentro de los sistemas productivos agrícolas, permitiendo la construcción de modelos conceptuales que puedan replicarse en contextos simulados de la Teoría de Sistemas en el Análisis Emergético (Esparza y Martínez Romero, 2021).

El uso de la teoría de sistemas complejos en el estudio de los sistemas agroforestales permite abordar la no linealidad de sus componentes y la diversidad de interacciones que existen dentro de estos sistemas, aspectos que los distinguen de los monocultivos convencionales. En un sistema agroforestal, la presencia de diferentes cultivos y especies arbóreas no solo incrementa la

biodiversidad, sino que también genera un conjunto de interacciones entre las especies y sus entornos, que contribuyen a mejorar la eficiencia en el uso de los recursos y a optimizar el aprovechamiento del espacio y la luz solar (Benítez et al., 2021). Así, la teoría de sistemas no solo permite entender los elementos que componen el sistema, sino también sus relaciones de dependencia y retroalimentación, elementos fundamentales para diseñar estrategias de manejo adaptativas en los sistemas agroecológicos.

Desde esta perspectiva, el análisis emergético se integra eficazmente con la teoría de sistemas al permitir la cuantificación de los flujos de energía y recursos en los agroecosistemas, lo que facilita la evaluación comparativa de diferentes sistemas productivos en términos de sostenibilidad. Al convertir todos los insumos en una única unidad de valor energético, el análisis emergético permite realizar comparaciones entre sistemas de monocultivo y sistemas agroforestales, identificando aquellos más eficientes y sostenibles desde el punto de vista energético y ambiental (Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 2004). Este enfoque es especialmente relevante en regiones donde la agricultura tradicional y los monocultivos han provocado degradación ambiental y pérdida de biodiversidad, ya que ofrece una metodología cuantitativa para evaluar y sustentar la transición hacia sistemas agroforestales que mejoren el uso de los recursos renovables y minimicen el impacto ambiental (Albino-Garduño et al., 2015).

Además, la aplicación de la teoría de sistemas en el contexto emergético permite visualizar cómo los procesos de retroalimentación en los sistemas agroforestales contribuyen a su estabilidad y resiliencia. La retroalimentación es un proceso clave en la teoría de sistemas, donde las acciones o cambios en un componente afectan a otros elementos, generando una respuesta que influye de nuevo en el componente inicial, lo cual es particularmente importante en sistemas complejos y adaptativos como los agroforestales (Johanne & Lynch, 2012). A través de la teoría de sistemas, es posible identificar cómo los diferentes elementos en un sistema agroforestal se ajustan para mantener un equilibrio dinámico, optimizando el uso de nutrientes y energía, lo que a su vez permite sostener una producción continua y estable. Según Martínez-Bautista (2017), esta perspectiva es esencial en los sistemas agroforestales tradicionales, como los manejados por comunidades indígenas, donde la compleja interacción entre elementos del sistema permite mantener la fertilidad del suelo y la eficiencia en el uso de recursos sin depender de insumos externos intensivos. Su investigación muestra cómo los sistemas agroforestales manejados con principios de la teoría de sistemas son capaces de adaptarse a cambios ambientales, maximizando la sostenibilidad y el rendimiento en contextos de escasez de recursos.

Al aplicar la teoría de sistemas a los modelos emergéticos, se facilita la integración de flujos de energía, materia y servicios ecosistémicos, los cuales representan los recursos clave en los sistemas agrícolas. Según García (2021), muestra cómo se organizan jerárquicamente los subsistemas dentro de un sistema complejo, evidenciando que cada nivel, desde el biológico hasta el socioeconómico, contribuye a la estabilidad y eficiencia del sistema en general. Esta estructura jerárquica permite

analizar cómo las perturbaciones en un nivel afectan los otros y, al mismo tiempo, cómo cada uno contribuye a la resiliencia del sistema en su conjunto.

Por otro lado, la teoría de sistemas facilita la construcción de modelos matemáticos que simulan el comportamiento de los agroecosistemas en diversas condiciones. Al integrar la emergía como variable en estos modelos, es posible evaluar la sostenibilidad de distintos escenarios productivos, facilitando la toma de decisiones informadas para mejorar el manejo de los sistemas agroforestales. Estos modelos, a su vez, permiten proyectar escenarios futuros que ayudan a adaptar la gestión de los recursos en función de los cambios ambientales y las variaciones climáticas, lo que resulta crucial en contextos de alta vulnerabilidad climática como las regiones subandinas (García-Barrios et al., 2021; Akinnifesi et al., 2010). Entonces, la teoría de sistemas proporciona un marco conceptual y metodológico para analizar la sostenibilidad de los sistemas agroforestales, permitiendo una integración efectiva con el análisis emergético. Al entender los agroecosistemas como sistemas complejos, dinámicos y adaptativos, es posible identificar las interacciones clave que determinan su sostenibilidad y resiliencia, y, a partir de ello, diseñar estrategias de manejo que fomenten la transición de monocultivo a sistemas agroforestales, contribuyendo a una agricultura más sostenible y eficiente en el uso de recursos.

6. METODOLOGÍA

6.1.FASE 1: Estudio Cienciométrico

Se realizó un análisis cienciométrico para identificar y establecer las categorías de análisis relacionadas con los flujos de energía, materia y servicios ecosistémicos de provisión, además de los vacíos de conocimiento. Este análisis fundamentará la comparación de la sostenibilidad de los agroecosistemas en una región subandina, centrándose en sistemas agroforestales y monocultivos convencionales.

Siguiendo la metodología descrita por Cardona-Román y Sánchez-Torres (2017), se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva en las bases de datos científicas Scopus, Web of Science, Google Scholar, y SciELO. Los términos de búsqueda incluyeron palabras clave como "análisis emergético", "sistemas agroforestales", "monocultivos" y "evaluación de la sostenibilidad agroecológica". El rango temporal se estableció en los últimos 24 años (2000 a 2024), teniendo en cuenta que es un concepto relativamente emergente, con el fin de capturar las tendencias más relevantes en la literatura científica.

En la **tabla 1** se evidencian los comandos de búsqueda empleados:

COMANDO	BÚSQUEDA
AND	Sostenibilidad emergética AND sistemas agroforestales Análisis emergético AND monocultivo AND agroforestal
NOT	Emergía NOT Energía

*	Sostenib* Emergétic*
“ ”	"Sostenibilidad emergética" AND "sistemas agroforestales" AND "Índices emergéticos"
( )	("Flujos de energía" OR "Flujos de materia") AND sostenibilidad

Tabla 1. Comandos de búsqueda empleados en la revisión. Elaboración propia.

Definición de criterios de inclusión y exclusión

Para asegurar la relevancia y calidad de los estudios seleccionados, se adoptan criterios de inclusión y exclusión, estos, son fundamentales para garantizar la calidad y relevancia de un análisis o revisión científica (Calzadilla, 2023). Los criterios de inclusión aseguran que los estudios seleccionados sean relevantes para el enfoque temático y periodo temporal del análisis (López et al., 2024). Los criterios de exclusión eliminan aquellos que no cumplen con los estándares necesarios, evitando datos irrelevantes o de baja calidad (Michán & Muñoz, 2013).

En la **Figura 1** se pueden visualizar los criterios adoptados Se definieron los criterios de inclusión como aquellos que consideraban la relación directa con el análisis emergético o la sostenibilidad agroforestal en contextos comparables a regiones andinas, además, se priorizaron artículos que abordaran temáticas relacionadas con el análisis emergético, la sostenibilidad agroforestal y los sistemas productivos agrícolas. Además, se seleccionaron estudios con enfoques cuantitativos que emplearan indicadores emergéticos como el EYR, ELR y ESI, publicados entre los años 2000 y 2024 en revistas indexadas con revisión por pares, especialmente artículos científicos. Por otro lado, los criterios de exclusión incluyeron estudios que no presentaran relación directa con agroecosistemas, aquellos sin aplicación cuantitativa, investigaciones en contextos no comparables, y publicaciones en revistas de baja calidad o sin revisión por pares. Asimismo, se descartaron artículos anteriores al año 2000, salvo aquellos considerados fundamentales para la teoría, como los de Odum (1988), Ulgiati (1998), Altieri (1999) y otros. Esta delimitación metodológica permitió enfocar el análisis en literatura científica pertinente y de alta calidad, asegurando resultados sólidos y consistentes. Este enfoque se basa en las recomendaciones de López *et al.* (2024), quienes sugieren delimitar la búsqueda a estudios que aborden específicamente Índices emergéticos.

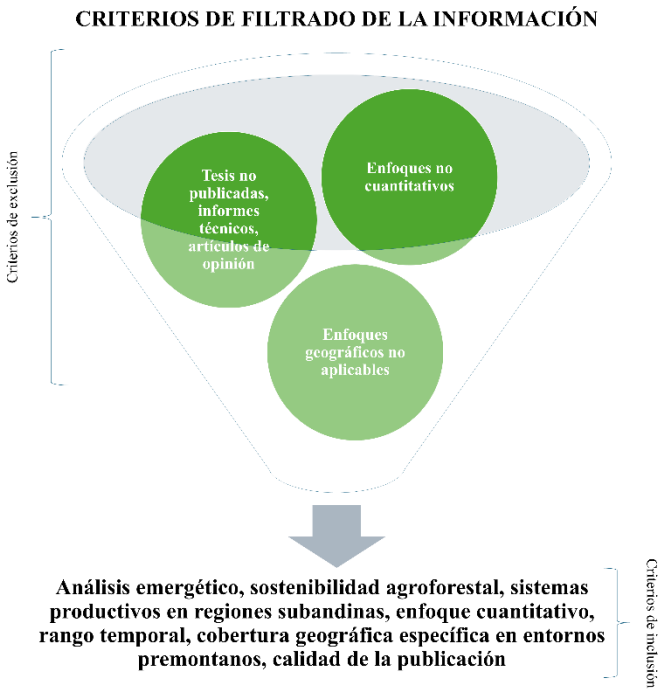


Figura 2. Criterios de inclusión y exclusión en la revisión de la información. Elaboración propia.

Clasificación de la información

Se establecieron criterios de clasificación y se codificaron los aspectos relevantes para la revisión, lo que permitió delimitar las categorías en la ventana de observación **(Tabla 2)**. Durante la revisión de los artículos, se asignaron códigos específicos a los fragmentos de texto o datos relevantes que correspondían a cada categoría y subcategoría. Este proceso dio lugar a una matriz global, donde se consignaron los artículos junto con sus principales características. Cada vez que un artículo respondía a múltiples categorías, se repetía el registro en la matriz, lo que facilitó la organización y el análisis posterior. Este enfoque permitió identificar patrones y tendencias de manera sistemática, la flexibilidad del método garantizó una clasificación adaptada a la diversidad de la literatura disponible.

Categoría	Descripción	Subcategoría	Código
Flujos de energía	Incluye todo lo relacionado con el uso, transformación y eficiencia energética en los sistemas productivos.	Consumo de energía renovable	FE1
		Eficiencia energética del sistema	FE2
		Dependencia de fuentes externas de energía	FE3
Flujos de materia	Referido a los movimientos de nutrientes, agua y otros materiales entre los componentes del sistema.	Ciclo de nutrientes	FM1
		Uso del agua	FM2
		Aporte de materia orgánica	FM3

Sostenibilidad emergética	Evaluación de la sostenibilidad a través de indicadores emergéticos específicos (EYR, ELR, ESI, etc.).	Renovabilidad (R%)	SE1
		Índice de Carga Ambiental (ELR)	SE2
		Índice de Sostenibilidad Emergética (ESI)	SE3
Modelación	Uso de software y herramientas para modelar la sostenibilidad de los sistemas.	Software y tipos de modelos	MC1
		Escala y parámetros del modelo	MC2
		Validación, calibración y simulación de escenarios	MC3

Tabla 2. Determinación de categorías de búsqueda de información. Elaboración propia.

Análisis y Visualización de los datos recopilados

El análisis de los resultados se llevó a cabo mediante una combinación de herramientas digitales que optimizaron el tiempo, permitieron el manejo de gran volumen de información y mejoraron la organización. En primer lugar, *Research Rabbit***,** un motor de búsqueda basado en inteligencia artificial facilitó la identificación de relaciones clave entre autores, conceptos y publicaciones, permitiendo explorar redes de colaboración y áreas temáticas relevantes en revistas indexadas de alto impacto. Complementariamente, se empleó *Scopus*, cuya funcionalidad de análisis de resultados permitió detectar tendencias temporales, principales autores, instituciones destacadas y términos clave relacionados con el análisis emergético y los sistemas agroforestales. Para estructurar y conectar conceptos derivados de la revisión, se utilizó *Obsidian* como soporte para organizar las notas y categorías definidas previamente. Este enfoque facilitó una visión más clara y dinámica de los datos, al tiempo que permitió identificar patrones conceptuales. Toda la información fue centralizada mediante *Zotero*, una herramienta de gestión bibliográfica que garantizó la integración y coherencia en el manejo de documentos en todas las plataformas utilizadas mediante la sincronización en la nube.

Los resultados analizaron la distribución de las publicaciones por año, los países de origen de los autores con mayor productividad en temas de sostenibilidad agroforestal y análisis emergético. Asimismo, se exploraron las redes de colaboración entre autores, las áreas de investigación predominantes según las categorías planteadas anteriormente, y los descriptores temáticos (subcategorías) más asociados al análisis emergético en agroecosistemas. Finalmente, se presentan las interrelaciones conceptuales evidenciadas a través de los datos recopilados.

Las preguntas que permitieron orientar el análisis fueron:

1. ¿Cómo es la distribución de las publicaciones por año?
2. ¿Cuáles son los tipos de referencias encontrados en la revisión?
3. ¿De qué países provienen los autores que más publican sobre sostenibilidad agroforestal y análisis emergético?
4. ¿Cuáles son las instituciones con mayor participación en la publicación sobre sostenibilidad y emergía?

5. ¿Cuál es la relación entre los principales autores, las revistas y las editoriales?
6. ¿Cuáles son las redes de autores que más publicaciones realizan en análisis emergético y en qué áreas investigan?
7. ¿Qué otros temas o descriptores se relacionan con el análisis emergético en agroecosistemas?
8. ¿Cómo se evidencia la relación entre conceptos?

6.2. FASE 2: Diseño del modelo matemático emergético

Esta fase se desarrolló siguiendo algunas de las metodologías empleadas por autores como Martínez (2017) y Casanova et al. (2014), particularmente en lo relacionado con el cálculo de energía asociada a recursos naturales como el agua, la radiación solar y la biomasa. Estos trabajos sirvieron como base conceptual y técnica, ya que en sus análisis se detalla la aplicación de la emergía como herramienta para evaluar la sostenibilidad de sistemas agrícolas y agroforestales bajo criterios biofísicos y sistémicos.

6.2.1. Transformación de categorías conceptuales en variables operativas

En esta etapa se realizó la articulación entre los resultados del Objetivo 1 y la estructura del modelo emergético definido para la Fase 2. En el Objetivo 1 se habían identificado las siguientes categorías de análisis: Flujos de energía, Flujos de materia, Sostenibilidad emergética y Modelación. Sin embargo, para efectos de la construcción del modelo, fue necesario reorganizar estas categorías en función de su operatividad y relación directa con las entradas y salidas del sistema productivo (Tabla 3).

Este cambio en la estructura de categorías se realizó con base en tres criterios fundamentales. En primer lugar, se consideró la correspondencia funcional con el sistema modelado, de modo que las categorías conceptuales fueron transformadas en componentes reales y cuantificables del sistema agroproductivo; por ejemplo, los flujos de energía se tradujeron en variables climáticas específicas como la radiación solar y la temperatura. En segundo lugar, se aplicó el criterio de relevancia emergética, priorizando aquellas variables que incidían directamente en el cálculo de emergía (seJ) y en la formulación de los Índices Clave de Sostenibilidad Emergética (ICSE), tales como los insumos externos, la biomasa generada y la eficiencia en el uso de nutrientes. Finalmente, se tuvo en cuenta la disponibilidad de datos, conservando únicamente aquellas categorías para las cuales existía información accesible o que podían ser representadas mediante modelación matemática.

Categoria objetivo 1	Categoria objetivo 2	Ajuste
Flujos de energía	Clima	La energía disponible en el sistema proviene del clima (temperatura, radiación solar, humedad, etc.), por lo que se reasigna a esta categoría.
	Insumos Agrícolas y Energéticos	Variables de fertilizantes, agua de riego, diésel y costos económicos se agrupan como fuentes externas.
Flujos de materia	Suelos	Los suelos regulan el flujo de materia, por lo que variables como textura, retención de agua y materia orgánica se incluyen aquí.

	Biomasa y Reciclaje de Nutrientes	Se crea una subcategoría dentro de Producción para agrupar biomasa total generada y reciclaje de materia orgánica.
	Producción y Rendimiento	Se reorganizan las variables de producción agrícola (rendimiento del cultivo, pérdida de producción
Sostenibilidad emergética	ICSE (Índices Emergéticos)	Se separan los indicadores emergéticos como un elemento final del modelo para facilitar el análisis.
Modelación	Desaparece como categoría	No es una categoría en sí, sino una metodología para el análisis. Se menciona en la parte metodológica del modelo.

Tabla 3. Transformación de las categorías de los resultados del estudio cienciométrico, a categorías de variables operativas. Elaboración propia.

Posteriormente, se definieron y clasificaron las variables necesarias para la construcción del modelo emergético. Estas fueron organizadas en dos grandes grupos: variables de entrada, que incluyen los componentes relacionados con el clima, las características del suelo y los insumos aplicados; y variables de salida, que comprenden la producción agrícola, la biomasa generada, las pérdidas, el reciclaje de materia orgánica y la eficiencia en el uso de nutrientes. La selección de estas variables se fundamentó en literatura especializada sobre análisis emergético en sistemas agroproductivos (Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 2004; Ortega et al., 2002), y se orientó hacia aquellas que permitieran modelar adecuadamente los flujos de materia y energía en ambos sistemas productivos, así como medir matemáticamente la sostenibilidad en el modelo.

Cada variable fue sistematizada en una matriz técnica (Tabla 4) que contempló su clasificación temática (clima, suelos, insumos, producción), su unidad de medida, su fuente de información y su tipo de comportamiento en el modelo (independiente, dependiente o constante). Esta estructuración respondió a la necesidad de facilitar su implementación en el entorno matemático de simulación y garantizar la trazabilidad de los datos durante las etapas de cuantificación y análisis emergético.

Clasificación	Categoría de Variable	Rótulo	Variable	Unidad de Medida	En los modelos	Se convierte a emergía?
Entrada	Clima	**TM**	Temperatura media	°C	**IGUAL**	**NO**
		PR	Precipitación	mm/mes	**IGUAL**	**NO**
		RS	Radiación solar	MJ/m2	**IGUAL**	**SI**
		HR	Humedad Relativa	%	**IGUAL**	**NO**
	Suelo	**CRA**	Capacidad de retención de agua	%	**IGUAL**	**NO**
		MO	Materia orgánica	%	**DIFIERE**	**NO**
	Insumos	**FA**	Fertilizante aplicado	kg/ha	**DIFIERE**	**SI**
		AR	Agua de riego	m3/ha	**DIFIERE**	**SI**
		CD	Consumo de Diesel	L/ha	**DIFIERE**	**SI**
		CTF	Costo total de fertilizantes	$/ha	**DIFIERE**	**NO**
		CTA	Costo total de agua de riego	$/ha	**DIFIERE**	**NO**
		CTD	Costo total de diésel	$/ha	**DIFIERE**	**NO**
Salida	Producción	**TPC**	Tiempo de producción del cultivo	Meses/días	**IGUAL**	**NO**
		RC	Rendimiento del cultivo	kg/ha	**DIFIERE**	**SI**
		BT	Biomasa total generada	kg/ha	**DIFIERE**	**SI**
		PP	Pérdida de producción	%	**DIFIERE**	**NO**
		MOR	Materia orgánica reciclada	kg/ha	**DIFIERE**	**SI**

Tabla 4. Definición de variables de entrada y de salida que alimentarán el modelo. Elaboración propia.

6.2.2. Selección de zonas representativas para la modelación para las variables de clima y suelo

Para la implementación del modelo emergético se seleccionaron diez municipios del departamento de Cundinamarca, distribuidos en distintas provincias y veredas con presencia confirmada de ecosistemas del bosque subandino, correspondientes a altitudes entre 1.000 y 2.400 metros sobre el nivel del mar. Esta franja altitudinal responde a la definición de bosque subandino húmedo utilizada por el IDEAM (2017) y otras instituciones ambientales para el contexto colombiano.

La selección de zonas se fundamentó en un proceso metodológico riguroso, considerando tres criterios principales:

1. ***Ubicación ecológica en región subandina:*** Se verificó que cada municipio se encontrara dentro del rango altitudinal y ecológico definido para el bosque subandino. Para ello, se revisaron mapas de zonificación ecológica del IDEAM, el Plan de Acción Cuatrienal (PAC) municipal (2020 - 2023) del departamento de Cundinamarca y cartografía de uso del suelo del IGAC.
2. ***Disponibilidad y confiabilidad de datos climáticos y edáficos:*** Se priorizaron únicamente municipios que contaran con estaciones meteorológicas activas, registradas oficialmente por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), que contaran con datos de temperatura, precipitación, humedad relativa y/o radiación solar. Además, se consideró la existencia de datos edáficos sobre textura del suelo, materia orgánica y capacidad de retención hídrica, disponibles a través del IGAC, el CIAT y otras plataformas de datos agroecológicos. La fuente principal para la validación fue el *Catálogo de Estaciones Hidrometeorológicas Activas* de la CAR (2020).
3. ***Presencia documentada de cultivos de interés productivo:*** Los municipios seleccionados presentaban evidencia, a través de reportes del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y del Plan de Acción Cuatrienal (PAC) municipal (2020 - 2023), de actividades agrícolas relacionadas con los cultivos de café, fríjol y maíz, tanto en forma de monocultivos como en sistemas agroforestales.

El resultado de este proceso fue la selección de diez zonas distribuidas principalmente en las provincias de Tequendama, Bajo Magdalena, Gualivá, Rionegro, Sabana Occidente y Magdalena Centro, todas con presencia activa de prácticas agrícolas en contextos subandinos. Esta delimitación no solo responde a criterios biofísicos y productivos, sino también a la disponibilidad real de datos confiables, lo cual es esencial para la implementación y calibración adecuada del modelo. La siguiente tabla presenta el detalle de las zonas seleccionadas:

Provincia	Municipios	Código de estación	Estación meteorológica	Altitud (m.s.n.m.)
BAJO MAGDALENA	GUADUAS	2306517	GUADUAS	1493
MAGDALENA CENTRO	PULÍ	2123502	PLACER EL	1335
GUALIVÁ	LA VEGA	2306516	EL ACOMODO	1394
SABANA OCCIDENTE	ZIPACÓN	2120652	PALOQUEMAO	2181
RIONEGRO	PACHO	2306507	ESC. VOCACIONAL PACHO	1940
TEQUENDAMA	LA MESA	2120647	ESPERANZA LA	1391
TEQUENDAMA	LA MESA	2120639	MESA LA	1215
TEQUENDAMA	SAN ANTONIO DEL TEQUENDAMA	2120646	MESITAS	1057
TEQUENDAMA	FUSAGASUGÁ	2119514	UNIV. FUSAGASUGÁ	1725
TEQUENDAMA	EL COLEGIO	2120182	PEÑAS BLANCAS	2118

Tabla 5. Selección de zonas de Cundinamarca aplicando los criterios de selección. Elaboración propia

6.2.3. Recolección de datos y estructura de variables

Toma de datos correspondientes al clima

La recolección de los datos climáticos correspondientes a temperatura media, precipitación, radiación solar y humedad relativa se efectuó mediante la consulta de fuentes oficiales nacionales como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Corporación Autónoma Regional (CAR), complementadas con fuentes internacionales como NASA POWER.

Para la obtención específica de las variables climáticas, se empleó una ventana temporal de 30 años, siguiendo las recomendaciones del IDEAM (2017), periodo considerado adecuado para asegurar la confiabilidad y representatividad de las series históricas analizadas. Inicialmente, la información recolectada se organizó en matrices individuales para cada variable climática según la estación meteorológica. En cada matriz se calcularon valores anuales mediante la aplicación del promedio aritmético simple, sumando los datos mensuales registrados durante cada año y dividiendo dicha suma entre la cantidad de meses considerados, generalmente doce.

Con los valores anuales calculados para cada estación meteorológica, se procedió a obtener un valor representativo anual para cada zona subandina seleccionada, mediante el cálculo del promedio aritmético simple de los valores anuales de las estaciones meteorológicas de cada zona específica. Finalmente, para establecer el escenario climático representativo del ecosistema subandino, se calculó un valor general mediante el promedio aritmético simple de los resultados obtenidos previamente para cada una de las zonas.

Este procedimiento permitió generar un conjunto de valores climáticos constantes y estandarizados, aplicables de manera uniforme al sistema agroforestal (SAF) y al monocultivo convencional, aspecto esencial para mantener condiciones comparativas homogéneas al implementar el modelo emergético. De esta manera, se redujo considerablemente la variabilidad estacional, garantizando una evaluación más precisa y consistente de ambos sistemas productivos.

Variables de Suelo

Dado que no fue posible obtener información local completa mediante cartografía nacional del IGAC, se recurrió a la base de datos global SoilGrids como fuente complementaria. Esta plataforma, basada en modelos predictivos geoestadísticos y algoritmos de aprendizaje automático, proporcionó estimaciones detalladas sobre propiedades edáficas, incluyendo contenido de materia orgánica y capacidad de retención de agua, sustentada en perfiles de suelo y otras covariables a nivel mundial (Hengl et al., 2017).

Textura del suelo (TS)

La caracterización de la textura del suelo fue descrita según la metodología establecida por el IDEAM (2017). No obstante, se decidió excluir esta variable del conjunto operativo del modelo emergético, debido a su naturaleza cualitativa que limita la integración en análisis cuantitativos específicos. Esta decisión estuvo respaldada por la consideración de que todas las zonas seleccionadas forman parte del ecosistema de bosque subandino, el cual presenta características edafológicas relativamente homogéneas. Así, se asumió que las propiedades texturales del suelo serían similares entre los municipios evaluados (FAO, 2015; IGAC, 2020).

Los suelos predominantes en estas zonas subandinas se caracterizaron por una textura franco arcillosa, con niveles moderados de limo y arcilla y menos del 40% de arena. Esta descripción coincide con la clasificación proporcionada por el USDA (2003) y es la más comúnmente reportada por estudios edafológicos realizados por el IGAC (2020) para zonas de mediana altitud (1.200–2.200 m s.n.m.).

Materia Orgánica (MO)

Para la estimación del contenido de Materia Orgánica (MO) en los suelos estudiados, se utilizaron los datos proporcionados por la plataforma global SoilGrids (Hengl et al., 2017). Esta herramienta suministra información geoespacial detallada sobre diversas propiedades del suelo, específicamente sobre el carbono orgánico del suelo (SOC, por sus siglas en inglés), expresado en decigramos por kilogramo (dg/kg). Con el objetivo de asegurar representatividad en la estimación, se seleccionaron las tres capas superficiales del perfil edáfico, correspondientes a las profundidades de 0–5 cm, 5–15 cm y 15–30 cm. Estas capas se eligieron debido a que representan la zona con mayor actividad biológica y con influencia directa en las prácticas agrícolas.

Inicialmente, se calcularon los valores promedio de SOC para cada una de las capas mencionadas. Posteriormente, se obtuvo un promedio general de estas tres profundidades, generando así un valor único y representativo del contenido de carbono orgánico en la franja superior del suelo (0–30 cm). Una vez obtenido este promedio general, se procedió a convertir el valor del carbono orgánico del suelo (SOC) en porcentaje de materia orgánica (%MO), mediante la aplicación del factor empírico de Van Bemmelen, ampliamente utilizado en la literatura especializada. Este factor establece que el carbono representa aproximadamente el 58 % del total de la materia orgánica en el suelo, por lo cual se utilizó la siguiente fórmula (Nelson & Sommers, 1996).

Lo anterior bajo la siguiente fórmula:

$$\%MO = \left(\frac{SOC\left(\frac{dg}{kg}\right)}{10}\right) \times 1{,}724$$

Donde el factor de conversión se obtiene de:

$$Factor = \frac{100}{58} \approx 1{,}724$$

Esta conversión permitió obtener un valor porcentual de materia orgánica coherente y ajustado a los estándares internacionales.

Dado que la plataforma SoilGrids no diferencia los valores específicos según los distintos usos de suelo, y considerando la predominancia histórica de monocultivos en las áreas evaluadas, se asumió que el valor estimado de 9,56 % representó la condición base del monocultivo (MON). Para estimar el contenido de materia orgánica en sistemas agroforestales (SAF), se recurrió a literatura especializada que evidencia incrementos en este parámetro debido a las prácticas agroforestales. Basándose en lo reportado por Salamanca y Sadeghian (2005), Hergoualc'h et al. (2012) y Furcal et al. (2023), se asumió un incremento promedio del 30 % en la materia orgánica respecto a los monocultivos, estableciendo así un valor ajustado final del 12,42 % para la materia orgánica en los SAF. Este procedimiento permitió integrar de manera precisa, robusta y comparable la variable MO dentro de la matriz emergética, facilitando así el análisis posterior de sostenibilidad en ambos sistemas productivos.

Capacidad de Retención de Agua (CRA)

La Capacidad de Retención de Agua (CRA) del suelo se estimó utilizando los datos del contenido volumétrico de humedad proporcionados por la plataforma SoilGrids (Hengl et al., 2017). Esta plataforma ofrece estimaciones globales de propiedades edáficas mediante modelos geoestadísticos y algoritmos de aprendizaje automático. Específicamente, se emplearon los valores correspondientes a dos tensiones críticas: -33 kPa, conocida como capacidad de campo (CC), y -

1500 kPa, denominada punto de marchitez permanente (PMP). Ambas tensiones representan los límites superior e inferior del rango de humedad aprovechable por las plantas.

Siguiendo el enfoque metodológico propuesto por Hillel (1998), la CRA se calculó como la diferencia entre el contenido volumétrico de agua a capacidad de campo y al punto de marchitez permanente. Para ello, se seleccionaron las capas más superficiales del perfil edáfico (0–5 cm, 5–15 cm y 15–30 cm), por ser las más activas biológicamente y con mayor influencia agrícola. Se procedió a calcular el valor medio de humedad para cada tensión en las tres capas mencionadas, generando un valor representativo conjunto para la franja 0–30 cm.

Los datos obtenidos de SoilGrids están expresados en unidades de $10^{-2} cm^3/cm^3$ multiplicadas por 10. Por tanto, fue necesario corregirlos dividiendo entre 10 para convertirlos a una escala porcentual. A partir de estos valores ajustados, se aplicó la siguiente fórmula para estimar la CRA:

$$CRA\% = \left(\frac{WC_{-33} - WC_{-1500}}{10}\right) \times 100$$

Donde WC_{-33} representa el contenido de agua a capacidad de campo y WC_{-1500} el contenido a punto de marchitez permanente.

Este procedimiento permitió incorporar la variable CRA al modelo emergético de forma coherente, manteniendo su comparabilidad con las demás variables edáficas y climáticas, y garantizando su pertinencia en el análisis de sostenibilidad de los sistemas agroforestales y monocultivos bajo condiciones subandinas (Hengl et al., 2017; Hillel, 1998).

Variables de insumos

La estimación de las variables relacionadas con el uso de insumos se realizó a partir de fuentes secundarias confiables, tales como bases de datos institucionales, literatura científica especializada y reportes técnicos emitidos por entidades del sector agropecuario. En particular, se consultaron publicaciones de CENICAFÉ, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, y estudios académicos enfocados en prácticas agrícolas representativas de la región andina. Cada variable fue tratada como una entrada directa al sistema productivo y, por tanto, cuantificada bajo criterios homogéneos, con el fin de garantizar su comparabilidad entre los dos sistemas evaluados, en casos donde la información específica era limitada, se recurrió a estimaciones fundamentadas en rangos documentados y referencias cruzadas.

Cálculo del Fertilizante aplicado (FA)

Para estimar la cantidad de fertilizante aplicado (FA), expresada en kilogramos por hectárea (kg/ha), se empleó una fórmula clásica ampliamente validada en la literatura agronómica, la cual relaciona el requerimiento nutricional del cultivo (R), la concentración del nutriente en el

fertilizante comercial (C) y, en el caso de los sistemas agroforestales (SAF), un factor de reducción (D) que refleja la eficiencia ecológica del sistema. Esta metodología ha sido utilizada en estudios técnicos especializados, como el desarrollado por Gavilánez-Luna y Gómez-Vargas (2022), y permite diferenciar cuantitativamente la demanda de insumos entre monocultivos convencionales y sistemas SAF.

El parámetro R corresponde al requerimiento nutricional del cultivo para un nutriente específico, expresado en kg/ha, y se refiere a la cantidad mínima necesaria para alcanzar un rendimiento óptimo. Este valor se establece generalmente a partir de estudios de campo o recomendaciones institucionales. Por su parte, el parámetro C representa la concentración del nutriente en el fertilizante comercial utilizado, expresada en porcentaje (%), según lo indicado en fichas técnicas agrícolas de productos estandarizados como la urea (46 % de N), el fosfato diamónico – DAP (46 % de P_2O_5) y el cloruro de potasio – MOP (60 % de K_2O), conforme a lo documentado por CENICAFÉ (2013) y AGROSAVIA (2018).

En el caso de los sistemas agroforestales, se introdujo un tercer parámetro, D, que actúa como un factor corrector para representar la reducción en el uso de fertilizantes sintéticos gracias a procesos ecológicos como la fijación biológica de nitrógeno, el reciclaje de nutrientes y la mayor eficiencia en la absorción de elementos minerales (Cropaia, 2024). Según Soto-Pinto et al. (2007), este factor oscila comúnmente entre el 20 % y el 30 %, por lo cual, en este estudio, se adoptó un valor conservador de 25 % para reflejar condiciones intermedias de eficiencia.

La ecuación empleada para calcular la cantidad de fertilizante requerido en monocultivos fue:

$$FA_i = \frac{R_i \times 100}{C}$$

Donde:

- FAi = Cantidad de fertilizante a aplicar (kg/ha)
- Ri = Requerimiento nutricional del cultivo (kg/ha de N, P o K)
- C = Concentración del nutriente en el fertilizante (%)

Para los sistemas agroforestales (SAF), se aplicó la siguiente fórmula ajustada:

$$FA_{SAF} = \left(\frac{R_i \times 100}{C}\right) \times (1 - D)$$

De esta forma, fue posible calcular de manera diferenciada las dosis necesarias de fertilizantes comerciales (urea, DAP y MOP) para los tres cultivos seleccionados (café, maíz y frijol), tanto en sistemas convencionales como en sistemas agroforestales (SAF), ajustando los resultados al contexto real de manejo agronómico en la región. Los valores de requerimiento nutricional (ver

tabla 6) utilizados para cada cultivo fueron tomados de fuentes técnicas reconocidas como CENICAFÉ (2013) y AGROSAVIA (2018), mientras que las concentraciones típicas de nutrientes en los fertilizantes comerciales se basaron en las especificaciones comunes reportadas por Cropaia (2024). La diferenciación entre sistemas se sustentó en la evidencia recopilada por Soto-Pinto et al. (2007), quienes documentan reducciones de entre el 20 % y el 30 % en la demanda de fertilizantes en SAF, y fue complementada por las recomendaciones técnicas de Gavilánez-Luna y Gómez-Vargas (2022), quienes precisan los requerimientos óptimos de nitrógeno, fósforo y potasio para cada tipo de cultivo.

Nutriente	Fertilizante comercial	Concentración (C)	Fuente de Requerimiento (R) por cultivo
N	**Urea**	**46 %**	**Café: 100, Maíz: 150, Frijol: 30 kg/ha**
P_2O_5	**DAP**	**46 %**	**Café: 50, Maíz: 60, Frijol: 25 kg/ha**
K_2O	**MOP (Cloruro de potasio)**	**60 %**	**Café: 90, Maíz: 120, Frijol: 40 kg/ha**

Tabla 6. Concentraciones y fuentes de requerimientos de nutrientes dispuestos por la literatura. Elaboración porpia

Cálculo de Agua de Riego (AR)

La estimación del requerimiento hídrico para los cultivos de café, maíz y frijol se realizó mediante la revisión de fuentes técnicas y estudios agroecológicos que reportan rangos representativos para condiciones subandinas. A partir de estas referencias, se definieron valores promedio diferenciados por cultivo y por tipo de sistema productivo. En primer lugar, se identificaron los rangos generales de consumo de agua por hectárea a partir de estudios realizados por Cenicafé (s.f.), FAO (2012, 2019), CIPAV (2021), Rodríguez et al. (2017) y Gamboa-Tuz et al. (2020). Con base en estas fuentes, se asignaron valores estimados de requerimiento hídrico anual para cada cultivo bajo condiciones de monocultivo, expresados en m^3/ha.

Posteriormente, se establecieron las reducciones correspondientes para los sistemas agroforestales (SAF), considerando la evidencia disponible sobre disminución en la necesidad de riego gracias a la presencia de cobertura vegetal, mejora en la estructura del suelo y creación de microclimas internos al sistema. La literatura consultada indica reducciones que oscilan entre el 10 % y el 30 % dependiendo del cultivo y las condiciones locales (FAO, 2019; Gamboa-Tuz et al., 2020; CIPAV, 2021). Para este estudio, se adoptó un valor de reducción intermedio del 15 % como parámetro conservador, con el fin de reflejar de manera equilibrada la eficiencia hídrica de los SAF en comparación con los sistemas convencionales.

La estimación final del volumen de agua aplicado en SAF se realizó mediante la siguiente fórmula de ajuste:

$$AR_{SAF} = AR_{MON} \times (1 - 0{,}15)$$

Este cálculo permitió integrar datos ajustados al contexto subandino para cada cultivo seleccionado, reconociendo las ventajas en términos de eficiencia hídrica que ofrecen los sistemas agroforestales frente al monocultivo (EOS Data Analytics, 2025; FAO, 2019; Cenicafé, s.f.).

Cálculo de consumo de Diesel (CD)

La estimación del consumo de diésel por hectárea se realizó en ausencia de datos nacionales desagregados por cultivo. Para ello, se consultaron fuentes internacionales como la FAO (2013), Agribalyse (ADEME, 2020) y Ecoinvent (2020), que reportan valores promedio entre 60 y 120 litros/ha/año en cultivos extensivos con mecanización moderada. A partir de estos rangos, y considerando las condiciones subandinas de Cundinamarca, se definieron los siguientes valores base para los sistemas de monocultivo: 120 L/ha/año para café, 100 L/ha/año para maíz y 80 L/ha/año para frijol.

Con estos valores, se procedió a calcular el consumo en los sistemas agroforestales (SAF) aplicando un factor de reducción diferenciado por cultivo, con base en la menor mecanización reportada en literatura especializada (FAO, 2013; Ecoinvent, 2020; Oviedo-Celis et al., 2022). Se aplicó una reducción del 30 % para café, 25 % para maíz y 20 % para frijol. La fórmula utilizada fue:

$$CD_{SAF} = CD_{MON} \times (1 - r)$$

donde r representa el porcentaje de reducción aplicado según el cultivo.

Valores de Costos de los insumos

Para estimar los costos económicos de los insumos aplicados en cada sistema productivo, se empleó una metodología directa basada en el cruce entre la cantidad requerida de cada insumo por hectárea y su valor unitario en el mercado colombiano para el año 2025. Esta estrategia permitió cuantificar el esfuerzo económico asociado a los fertilizantes, el agua de riego y el diésel, diferenciando entre monocultivo y sistemas agroforestales (SAF), y garantizando coherencia con la estructura del modelo emergético.

En primer lugar, el Costo Total de Fertilizantes (CTF) se calculó multiplicando la cantidad de fertilizante estimada por cultivo (en kg/ha), obtenida en el apartado anterior, por el precio promedio por kilogramo del fertilizante comercial correspondiente. Los valores unitarios fueron consultados en plataformas de distribución agrícola y puntos de venta autorizados en Colombia, vigentes para

el primer semestre del año 2025(AGROFUTURO, 2025; Fedearroz, 2025). Aunque se reconoce la variabilidad de los precios según región y proveedor, se seleccionaron cifras representativas y estables para productos como la urea, el DAP y el MOP, conforme a las tendencias de comercialización observadas en el país.

Para calcular el Costo Total del Agua de Riego (CTA), se utilizó el volumen de agua requerido por hectárea, ya ajustado para los SAF con un factor de reducción del 15 %, respaldado por estudios que demuestran una mayor eficiencia hídrica en sistemas con cobertura vegetal y sinergias agroecológicas (CIPAV, 2021; Gamboa-Tuz et al., 2020). Luego, se asignó un valor unitario de $4.000 COP por metro cúbico, calculado como promedio entre las tarifas oficiales vigentes para el año 2025 en empresas prestadoras de servicios de Bogotá, Girardot y Tequendama (EAAB Bogotá, 2025; Aguas del Tequendama, 2025; Acuadyr, 2025). El resultado por hectárea se obtuvo multiplicando el volumen requerido de agua por dicho valor de referencia.

Finalmente, el Costo Total de Diésel (CTD) se estimó utilizando un precio promedio de $9.000 COP por litro. Este valor fue definido con base en las proyecciones de precios del ACPM subsidiado para el sector agrícola en Colombia, considerando los informes más recientes del Ministerio de Minas y Energía y los observatorios de costos de producción agropecuaria (Acpm.gov.co, 2024; MinMinas, 2024; Agronet, 2023). Según estas fuentes, el precio por litro de diésel para uso rural en Cundinamarca oscila entre $8.500 y $9.500 COP, dependiendo de la ubicación geográfica y la disponibilidad logística. Por tanto, se seleccionó un valor intermedio representativo que refleja las condiciones proyectadas para el año de referencia

Variables de producción

Tiempo de producción del cultivo (TPC)

Para estimar el Tiempo de Producción del Cultivo (TPC), se definió el número de días desde la siembra hasta la cosecha comercial, con base en el comportamiento fenológico reportado para cada cultivo. Se establecieron valores únicos para ambos sistemas (monocultivo y SAF), al no encontrarse evidencia de diferencias significativas atribuibles al tipo de sistema.

En el caso del café, se asignaron 360 días como ciclo productivo anual, tomando como base los reportes de Cenicafé (s.f.) y Cafés de Colombia (2024), que indican que, tras una primera cosecha entre los 2,5 y 3,5 años, el cultivo mantiene ciclos regulares anuales. Esta duración fue adoptada en concordancia con los criterios de modelación propuestos por Brown y Ulgiati (2004) para cultivos perennes establecidos. Para el maíz, se utilizaron 120 días como TPC, valor tomado de Agrosavia (2021) y reportes de la FAO, que documentan ciclos productivos entre 120 y 150 días en condiciones subandinas. Para el frijol, se establecieron 90 días, con base en los rangos de 80 a 100 días identificados en fichas técnicas y literatura regional (FAO, s.f.). Para el frijol, se definió

un TPC de 90 días, de acuerdo con los rangos de 80 a 100 días reportados en documentos técnicos de la FAO (s.f.) para cultivos de ciclo corto en condiciones tropicales de altitud media.

Estos valores se integraron directamente al modelo emergético como unidades temporales estandarizadas por cultivo.

Rendimiento del cultivo (RC)

La variable Rendimiento del Cultivo (RC) fue definida como la cantidad total de producto cosechado por hectárea (kg/ha) durante un ciclo productivo, en concordancia con la conceptualización propuesta por la FAO (2017), que la utiliza como indicador central para evaluar la eficiencia y el desempeño agronómico de los sistemas agrícolas. Para su estimación, se construyó una matriz comparativa entre los sistemas de monocultivo (MON) y los sistemas agroforestales (SAF), utilizando valores de referencia extraídos de literatura científica, estudios institucionales y bases de datos agrícolas verificadas.

En primer lugar, se asignaron los rendimientos base para el modelo de monocultivo, tomando como referencia los promedios reportados por organismos internacionales como la FAO (s.f.), y estudios técnicos de Agrosavia (2021) y Cenicafé (s.f.) aplicables al contexto colombiano. Estos valores fueron definidos por cultivo, considerando condiciones agroecológicas medias y prácticas convencionales de manejo en zonas subandinas. Posteriormente, se aplicaron factores de ajuste diferenciados para el modelo SAF, en función de las modificaciones en la productividad típicamente observadas en sistemas combinados. En el caso del café, se asumió una reducción del 25 % respecto al rendimiento en monocultivo, atribuida a la competencia por luz y nutrientes en etapas iniciales, como ha sido documentado por CIFOR (2022) y la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (s.f.). Para el maíz, se aplicó una reducción del 15 % en SAF, justificada por la menor densidad de siembra y el sombreado parcial, en línea con lo reportado por Niether et al. (2025). En contraste, para el frijol se estimó un incremento del 15 % en los sistemas SAF, asociado a los beneficios de fijación biológica de nitrógeno, la mejora en las condiciones microclimáticas y la menor competencia por espacio, tal como se evidencia en Shibu (2009) y Organic Farm Knowledge (s.f.).

Biomasa total generada (BT)

La variable Biomasa Total Generada (BT) fue definida como la cantidad de materia orgánica seca producida por hectárea (t/ha), incluyendo tanto las partes cosechables del cultivo principal como los residuos vegetales (tallos, hojas, raíces) (Ibáñez, 2022). En el caso de los sistemas agroforestales (SAF), se incluyó además la biomasa generada por las especies arbóreas intercaladas, como frutales o maderables de uso frecuente en regiones subandinas, tales como *Inga edulis*, *Persea americana* o *Citrus spp.*, conforme a lo documentado por Marín et al. (2016) y CIFOR (2022).

Para la estimación de esta variable, se diferenciaron los contextos de monocultivo (MON) y SAF. Se utilizaron valores promedio reportados en la literatura científica y técnica, aplicando criterios de selección que priorizaron estudios realizados en zonas tropicales de altitud media, especialmente en Colombia y América Latina. Los datos se tomaron de mediciones de campo y modelos alométricos basados en el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura del dosel, tal como ha sido descrito por Ibáñez (2022), Marín et al. (2016) y López et al. (2016).

En los sistemas SAF, se identificaron valores de biomasa aérea significativamente más altos, con registros que alcanzan hasta 72,5 t/ha en sistemas agroforestales con frutales, frente a 25,6 t/ha en monocultivos como cacao o café (Marín et al., 2016; Ibáñez, 2022). No obstante, para fines comparativos con monocultivo, se excluyó del análisis la biomasa arbórea permanente de largo plazo, y se priorizó únicamente la biomasa generada por ciclo agrícola. En el caso del café, Cenicafé (s.f.) reporta rendimientos de biomasa aérea entre 3 y 5 t/ha en monocultivo, mientras que en SAF con árboles de sombra y frutales, la biomasa puede duplicarse o triplicarse. Con base en esta evidencia, se adoptó un incremento del 125 % para representar el aporte adicional en sistemas agroforestales. Para el maíz, se utilizó un valor base de 10 t/ha en monocultivo, correspondiente a la biomasa total del cultivo (incluyendo grano, tallos, hojas y raíces), en concordancia con estimaciones de la FAO (s.f.) para sistemas bien manejados. En SAF, se aplicó un incremento del 25 %, reflejando el aporte moderado pero significativo de la vegetación arbórea y la mejora en eficiencia de uso del recurso solar (CIFOR, 2022). En el caso del frijol, se asignó una biomasa total de 5,5 t/ha en monocultivo, valor respaldado por estudios en leguminosas tropicales, y se aplicó un incremento del 27 % en SAF, considerando los beneficios agronómicos asociados a la fijación biológica de nitrógeno y las condiciones microclimáticas favorables (Niether et al., 2025; FAO, s.f.).

Pérdida de producción (PP)

La variable Pérdida de Producción (PP) fue definida como el porcentaje de rendimiento no alcanzado respecto al rendimiento potencial estimado para cada cultivo, considerando las condiciones agroecológicas óptimas de la región. Para su cálculo, se aplicó la fórmula propuesta por Barrantes et al. (2016), ampliamente utilizada en análisis de sostenibilidad productiva en sistemas agrícolas familiares:

$$PP = \frac{R_p - R_r}{R_p} \times 100$$

Donde:

- PP = Pérdida de producción (%).
- Rp = Rendimiento potencial o esperado sin pérdidas (kg/ha).
- Rr = Rendimiento real o obtenido (kg/ha).

Esta fórmula también puede expresarse como $PP=(1-Rr/Rp)\times 100$, representando la fracción no lograda del rendimiento total esperado.

Para este estudio, se tomaron como valores de referencia de rendimiento potencial (Rp) aquellos reportados por literatura técnica institucional y científica para cultivos de café, maíz y frijol en condiciones subandinas óptimas (FAO, 2023; Cenicafé, s.f.; Agrosavia, 2021). Los valores de rendimiento real (Rr) fueron los previamente estimados en esta investigación para ambos modelos productivos.

En sistemas de monocultivo (MON), se asignaron valores de PP base con base en reportes regionales de pérdida agronómica. En el caso del café, Morales López (2021) y Oviedo-Celis et al. (2022) reportan pérdidas cercanas al 30 % por efectos de estrés hídrico, menor cobertura vegetal y mayor presión de plagas. En los SAF, esas pérdidas se reducen al 15 % gracias a una mayor resiliencia microclimática y a la diversificación funcional, como respaldan CIFOR (2022) y EOS Data Analytics (2025). Para el maíz, FAO (2023) y estudios de CIFOR (2022) documentan pérdidas de hasta 30 % en monocultivo, reducidas a 15 % en SAF debido a la mejora en la estructura del suelo y el control natural de plagas. En el caso del frijol, la reducción fue estimada en un 50 %, pasando de un 20 % en monocultivo a un 10 % en SAF, siguiendo las observaciones de Niether et al. (2025), quienes destacan el efecto positivo de la fijación biológica de nitrógeno y la cobertura arbórea.

Adicionalmente, se aplicó una fórmula ajustada para modelar las reducciones proporcionales en SAF:

$$PP_{MON} = PP_{Base}$$

$$PP_{SAF} = PP_{Base} \times (1 - r)$$

Donde:

- $PPbase$ = Pérdida promedio en monocultivo (%).
- r = Reducción relativa de pérdidas en SAF

Esta adaptación permitió cuantificar las diferencias en eficiencia productiva entre ambos sistemas bajo una lógica comparativa coherente.

Materia orgánica reciclada (MOR)

La variable Materia Orgánica Reciclada (MOR) fue definida como la fracción de la biomasa total generada que retorna al sistema en forma de residuos orgánicos —como hojarasca, raíces finas, tallos o restos de cosecha— y que contribuye al enriquecimiento del suelo. Dado que este componente no se encuentra directamente registrado en bases de datos oficiales, su estimación se

basó en revisiones científicas y estudios empíricos sobre agroecosistemas tropicales, especialmente en sistemas agroforestales (SAF), donde el reciclaje de materia orgánica es un proceso ampliamente documentado (Shibu, 2009; Marín et al., 2016; Montagnini et al., 1994; Prause & Gallardo, 2000).

Para la estimación, se utilizaron valores promedio de biomasa total generada por hectárea para cada cultivo y sistema productivo, con base en los rangos reportados por Ibáñez (2022), FAO (s.f.), CIFOR (2022) y Marín et al. (2016). En monocultivo (MON), se adoptó un valor de 3 t/ha como promedio representativo, mientras que en SAF se utilizó un valor ajustado de 7 t/ha, considerando la presencia de especies arbóreas intercaladas y mayor acumulación de residuos vegetales.

A estos valores de biomasa se les aplicó una tasa de reciclaje promedio, estimada según el tipo de sistema. En el caso de los monocultivos, diversos estudios sitúan esta tasa entre el 5 % y el 15 %, siendo conservador asignar un 10 % (FAO, s.f.; Niether et al., 2025). Para los SAF, donde se han documentado retornos de entre 20 % y 30 % de la biomasa total al suelo, se adoptó un valor promedio de 25 %, como lo proponen Marín et al. (2016) y Montagnini et al. (1994). Con base en esta información, la cantidad de materia orgánica reciclada por hectárea se calculó mediante la fórmula:

$$MOR = BT \times TR$$

donde:

- MOR = Materia Orgánica Reciclada (kg/ha),
- BT = Biomasa Total generada (kg/ha),
- TR = Tasa de Reciclaje (fracción decimal).

Así, para el monocultivo se estimó una MOR de 300 kg/ha (3.000 kg × 0.10) y para SAF una MOR de 1.750 kg/ha (7.000 kg × 0.25), reflejando las diferencias sustanciales en el ciclado interno de nutrientes y retorno orgánico al suelo.

De manera complementaria, para estudios más detallados de necesidades de enmiendas orgánicas o formulación de aportes frescos al suelo, se consideró también la ecuación general para estimar la materia fresca necesaria (MF), según el Manual del IICA (2015):

$$MF = \frac{S \times p \times D_a \times \Delta Mo}{\%ms \times k}$$

Donde:

- MF = Materia fresca a aportar (kg o t/ha)
- S = Superficie (m²)
- p = Profundidad del suelo (m)

- Da = Densidad aparente del suelo (kg/m³)
- ΔMo = Incremento deseado en materia orgánica (fracción decimal)
- $\%ms$ = Porcentaje de materia seca del material orgánico
- k = Factor de corrección según material (ej. 0.45 para estiércol compostado)

No obstante, para el presente modelo emergético, se optó por una aproximación simplificada, basada exclusivamente en los valores de biomasa reciclada, con el fin de mantener coherencia metodológica y facilitar la comparación entre municipios sin introducir nuevas variables edáficas no disponibles para todos los casos.

6.2.4. Modelación matemática de SAF y MON con ajuste según condiciones ecológicas

Para esta fase, se diseñó un modelo matemático emergético que permitiera ajustar las variables productivas de cada sistema (MON_Café, MON_Maíz, MON_Frijol y SAF_Mixto) teniendo en cuenta las condiciones climáticas y edáficas observadas. En el caso del SAF, se asumió una proporción de área del 50 % café, 25 % maíz y 25 % frijol.

El modelo incorporó seis variables de contexto: precipitación (PR), capacidad de retención de agua (CRA), materia orgánica (MO), temperatura media (TM), humedad relativa (HR) y radiación solar (RS). Estas variables se usaron como modificadoras, es decir, permitieron ajustar otras variables que sí se convierten a emergía, como la biomasa generada (BT), el agua de riego (AR) y los fertilizantes aplicados (FA). Este modelo se fundamenta en la integración de variables climáticas y edáficas como modificadores funcionales (Tabla 7), es decir, no se consideran meramente como contexto, sino como factores que influyen directamente en la eficiencia del sistema.

Variable de contexto	Variable afecta	Relación funcional estimada
PR (Precipitación)	Agua de riego (AR)	Inversamente proporcional: a mayor PR, menor necesidad de AR
CRA (% Retención)	Agua de riego (AR)	Mayor CRA → mayor eficiencia hídrica
MO (% materia orgánica)	Fertilizante aplicado (FA)	A mayor MO, mayor reciclaje y menor necesidad de FA
TM (Temperatura media)	Biomasa total generada (BT)	Temperatura óptima → mayor eficiencia fisiológica
HR (Humedad relativa)	AR y pérdidas productivas (PP)	HR alta → menor evaporación y menor PP
RS (Radiación solar)	BT	RS adecuada → mejora fotosíntesis → mayor BT

Tabla 7. Relación de afectación entre variables. Elaboración propia.

Con base en esta relación, se clasificaron las condiciones ecológicas como favorables, neutras o desfavorables, según rangos de referencia encontrados en la literatura técnica (Ramos Cantillo et al., 2019; Steduto et al., 2009; FAO, 2012; Jones et al., 2003). A cada categoría se le asignó un valor de codificación: +1 para condiciones favorables, 0 para neutras y –1 para desfavorables.

La tabla utilizada fue la siguiente:

Variable	Unidad	+1 (favorable)	0 (neutra)	–1 (desfavorable)
Precipitación (PR)	mm	> 120	80 – 120	< 80
Capacidad de Retención de Agua (CRA)	%	> 12	8 – 12	< 8
Materia Orgánica (MO)	%	> 7	4 – 7	< 4
Temperatura Media (TM)	°C	18 – 22	15 – 17.9 o 22.1 – 24	< 15 o > 24
Humedad Relativa (HR)	%	> 75	65 – 75	< 65
Radiación Solar (RS)	cal/cm²	> 260	220 – 260	< 220

Tabla 8. Rangos de referencia de los valores estimados. Elaboración propia.

Cada condición fue evaluada con base en los valores promedio de cada sistema, asignándole una codificación *Ci* correspondiente. Posteriormente, se calculó un factor de corrección *f*, definido como una constante que representa la influencia agregada de las condiciones ambientales sobre las variables productivas del modelo. La fórmula utilizada fue:

$$f = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \times C_i$$

Donde:

- α_i : Peso asignado empíricamente a cada condición Ci (como PR alta, CRA baja, etc.).
- C_i: Condición ambiental codificada en escala de impacto (-1, 0, +1).
- n es el número total de condiciones consideradas (n = 6)

Este factor se utilizó para ajustar de forma proporcional tres variables clave del modelo: biomasa total generada (BT), agua de riego (AR) y fertilizantes aplicados (FA), aplicando la siguiente fórmula general:

$$Variable\ ajustada = Valor\ esperado \times (1 + f)$$

En esta etapa, se realizó un ajuste realista y proporcional de las variables productivas del sistema SAF, reconociendo su eficiencia ecológica frente a los monocultivos. A diferencia de los ajustes

iniciales aplicados de forma uniforme, se adoptó un enfoque más coherente en el que se duplicó la biomasa generada (BT), como respuesta positiva a condiciones ecológicas favorables, y se aplicó una reducción del 30 % a los insumos de agua de riego (AR) y fertilizantes (FA_N, FA_DAP, FA_MOP). Esta proporción ya había sido reportada en la fase de recolección de datos como un rango típico de eficiencia en la reutilización de materia orgánica y uso de insumos en sistemas agroforestales. La fórmula empleada fue:

$$\text{Variable ajustada} = \text{Valor esperado} \times (1 + \text{f}) \quad (\text{para BT})$$

$$\text{Variable ajustada} = \text{Valor esperado} \times (1 - 0.30) \quad (\text{para FA y AR})$$

Este procedimiento permitió representar de forma verosímil la eficiencia relativa del SAF sin eliminar completamente la presencia de insumos externos, y se utilizó como base para la posterior conversión a energía solar equivalente (seJ) y el cálculo de los Índices de Sostenibilidad Emergética (ICSE).

6.2.5. Conversión de flujos a energía solar equivalente (seJ)

Siguiendo la metodología planteada por Odum (1996) y Brown & Ulgiati (2004), se procedió a convertir los flujos clave del modelo a energía solar equivalente (seJ), que es la unidad estándar utilizada en contabilidad emergética. Esta conversión permitió cuantificar la cantidad de emergía invertida en cada sistema productivo (*MON_Café, MON_Maíz, MON_Frijol y SAF*) con base en sus variables ajustadas.

Se trabajó con cinco variables fundamentales: biomasa total generada (BT), agua de riego (AR), y tres tipos de fertilizantes aplicados (FA_N, FA_DAP y FA_MOP). Para cada una, se tomó el valor ajustado previamente calculado en la fase 6.2.2 y se le aplicó una transformidad específica, obtenida de fuentes reconocidas en la literatura emergética (Odum, 1996; Ortega et al., 2002).

El procedimiento se desarrolló en los siguientes pasos:

1. **Asignación de transformidades**: A cada recurso se le asignó una transformidad (seJ/unidad) basada en su tipo y naturaleza energética determinada por la literatura.

Variable	Unidad	Transformidad aplicada (seJ/unidad)
BT	t	1.80×10^9
AR	m^3	1.82×10^4
FA_N	kg	6.39×10^9
FA_DAP	kg	1.04×10^{10}
FA_MOP	kg	8.20×10^9

Tabla 9. Transformidades asignadas a cada variable según la literatura. Elaboración propia en base a (Odum, 1996; Ortega et al., 2002).

2. **Conversión a emergía**: Se multiplicó el valor ajustado de cada variable por su transformidad correspondiente, utilizando la fórmula general:

$$seJ\ del\ flujo = cantidad\ ajustada\ del\ recurso\ (J, L, kg)\ x\ Transformidad\ (seJ/J)$$

Una vez se convirtió cada flujo a *seJ* mediante su transformidad respectiva, se suman todos los flujos para obtener el valor total de energía solar equivalente para el sistema. La ecuación general es:

$$seJ\ total = \sum (cantidad\ de\ flujo\ x\ transformidad)$$

6.2.6. Cálculo de los Índices de Sostenibilidad Emergética (ICSE)

Con el fin de comparar la eficiencia y sustentabilidad relativa del SAF frente al monocultivo, bajo condiciones climáticas y edáficas similares (Ulgiati & Brown, 1998). Se calcularon los Índices Clave de Sostenibilidad Emergética (ICSE), el rendimiento (%R), la razón de rendimiento emergético (EYR), el índice de carga ambiental (ELR), y la razón de sostenibilidad emergética (ESI). Cada índice fue configurado para evaluar la renovabilidad de los recursos y la eficiencia del sistema en la conservación de energía

Una vez cuantificados los flujos emergéticos, se procederá al cálculo de los indicadores clave de sostenibilidad emergética:

- **%R** – Porcentaje de recursos renovables – $\%R = \left(\frac{R}{U}\right) \times 100$
- **EYR** – Razón de rendimiento emergético - $EYR = \frac{U}{F}$
- **ELR** – Índice de carga ambiental – $ELR = \frac{N+F}{R}$
- **ESI** – Índice de sostenibilidad emergética – $ESI = \frac{EYR}{ELR}$

Donde:

- **U** corresponde a la emergía total del sistema.
- **F** es la suma de todos los insumos externos transformados a seJ.
- **R** corresponde al valor de la biomasa ajustada transformada a seJ.
- **N** se consideró igual a 0, ya que no se incorporaron flujos no renovables locales explícitos en este modelo.

Para ello, se clasificaron los flujos de cada sistema en tres categorías, **R**, correspondiente a los recursos renovables, representados en este caso por la biomasa total generada (BT); **F**, que incluye los recursos comprados, como los fertilizantes aplicados y el agua de riego; y **N**, que hace referencia a los recursos no renovables locales. En este modelo, la categoría N no fue considerada, dado que no se incorporaron explícitamente flujos de origen mineral, edáfico o degradación del suelo. Esta

clasificación permitió aplicar las fórmulas propuestas por Ulgiati y Brown (1998) para determinar la sostenibilidad relativa de cada sistema productivo.

6.3. FASE 3: Formulación de una estrategia de transición basada en ICSE y teoría de sistemas

Esta fase tuvo como objetivo formular una estrategia de transición fundamentada en los resultados obtenidos del modelo matemático emergético, estructurada a partir de la comparación entre sistemas de monocultivo y agroforestales (SAF) en zonas subandinas. El enfoque se sustentó en principios de la teoría de sistemas y en la integración de indicadores de sostenibilidad (ICSE), con el propósito de generar una recomendación adaptativa sobre la viabilidad de la transición, más que una predicción determinista. Para ello, se construyó un algoritmo de decisión lógico-condicional que, a partir del análisis comparativo de los ICSE, permitió definir de manera cuantitativa y estructurada posibles escenarios de acción.

Esta aproximación metodológica integró los principios del análisis emergético propuesto por Brown y Ulgiati (2004) con el enfoque de modelación axiomática de Grigoroudis, Kouikoglou y Phillis (2024), ofreciendo un instrumento riguroso, replicable y adaptativo. La modelación axiomática permitió estructurar la evaluación de la sostenibilidad a partir de principios fundamentales considerados válidos sin necesidad de demostración, estableciendo reglas básicas que guiaron la combinación de múltiples indicadores en un índice compuesto. Este procedimiento garantizó consistencia lógica, objetividad y capacidad de réplica en la toma de decisiones sobre la transición agroforestal.

Definición de variables de entrada, parámetros críticos y reglas de decisión

Los indicadores ICSE relevantes (EYR, ELR, ESI y porcentaje de uso de recursos renovables), calculados en la Fase 2, constituyen las variables de entrada del algoritmo. A partir de estos, se definen parámetros críticos de sostenibilidad, tales como umbrales de ESI y ELR aceptables, siguiendo el enfoque de Brown y Ulgiati (2004). Posteriormente, se establecen reglas matemáticas de decisión que guían la transición de monocultivos hacia sistemas agroforestales, ajustando el enfoque metodológico de Grigoroudis, Kouikoglou y Phillis (2024). Estas reglas estructuran la lógica del algoritmo y permiten recomendar acciones estratégicas de transición en función del comportamiento cuantitativo de los indicadores ICSE.

Indicador	Parámetro Crítico	Regla de Decisión	Interpretación
R%	$R\% \geq 40\ \%$	Condición favorable para transición inmediata	Alta dependencia de fuentes renovables, menor presión ambiental.
	$30\ \% \leq R\% < 40\ \%$	Recomendar transición con mejora de renovabilidad	Se requiere aumentar uso de recursos renovables antes de consolidar transición.
	$R\% < 30\ \%$	No recomendar transición	Dependencia crítica de recursos no renovables; no sostenible.

EYR	EYR > 2	Recomendar transición inmediata	Alta eficiencia energética; el sistema genera más emergía de la que invierte.
	1,5 < EYR ≤ 2	Recomendar transición con mejora de eficiencia	Sistema aceptable pero requiere optimización de rendimiento.
	EYR ≤ 1,5	No recomendar transición	Baja eficiencia energética; sistema débil frente a insumos externos.
ELR	ELR < 2	Recomendar transición inmediata	Baja presión ambiental; el sistema aprovecha recursos renovables.
	2 ≤ ELR ≤ 3	Recomendar transición con ajuste de manejo	Sistema bajo presión moderada; se recomienda optimizar el uso de insumos.
	ELR > 3	No recomendar transición	Alta presión ambiental; insostenible sin intervenciones correctivas.
ESI	ESI > 2	Recomendar transición inmediata	Alta sostenibilidad emergética; excelente balance eficiencia/carga.
	1 < ESI ≤ 2	Recomendar transición con monitoreo	Sostenibilidad moderada; transición viable bajo seguimiento.
	0,5 < ESI ≤ 1	Recomendar transición condicionada a ajustes	Sostenibilidad baja; se necesitan correcciones antes de consolidar el cambio.
	ESI ≤ 0,5	No recomendar transición	Muy baja sostenibilidad; prioridad en restaurar primero.

Tabla 10. Matriz de Parámetros Críticos y Reglas de Decisión. Elaboración propia en base a los criterios de Odum (1996); Brown & Ulgiati (2004); Pulselli et al. (2011).

6.3.1. Estructuración del algoritmo de transición: Siguiendo el principio de modelación simplificada de sistemas (Semitiel García & Noguera Méndez, 2004), se desarrolla un algoritmo compuesto por funciones condicionales, ponderaciones y pasos secuenciales que conducen a recomendaciones específicas para cada situación de partida. Se utiliza una representación modular, que facilita ajustes futuros. Este, opera como una estructura lógica de apoyo a la toma de decisiones, no como un sistema automatizado. Su implementación es heurística y permite sistematizar criterios de sostenibilidad para orientar recomendaciones sobre la transición agroforestal.

7. RESULTADOS

7.1. ESTUDIO CIENCIOMÉTRICO

Para la recopilación de información se revisaron 127 artículos científicos, los cuales fueron categorizados utilizando las herramientas especializadas que facilitaron su clasificación. La identificación de las categorías se basó en el análisis del título, el resumen y las palabras clave de cada documento, complementado por los criterios de inclusión y exclusión que permitieron una clasificación preliminar de relevancia en tres niveles; alta, para documentos directamente enfocados en el análisis emergético y su aplicación; moderada, para estudios complementarios; y baja, para referencias de aplicabilidad tangencial. Y, en este orden de prioridad se codificaron.

Los primeros resultados, referentes al análisis de la distribución temporal de publicaciones **(Figura 2)** muestra una evolución constante en el interés por el análisis emergético y los sistemas agroforestales. a partir del año 2000. Durante las décadas de 2000 y 2010, los temas predominantes incluyen estudios de sostenibilidad emergética aplicados a sistemas agrícolas convencionales y emergía en sistemas integrados como agroforestería y acuicultura. En los años más recientes (2018-2023), se observa un enfoque creciente en la aplicación de herramientas y en el análisis de servicios ecosistémicos vinculados a sistemas de producción sustentable. Este patrón sugiere una evolución desde estudios descriptivos hacia enfoques más integrales y tecnológicos.

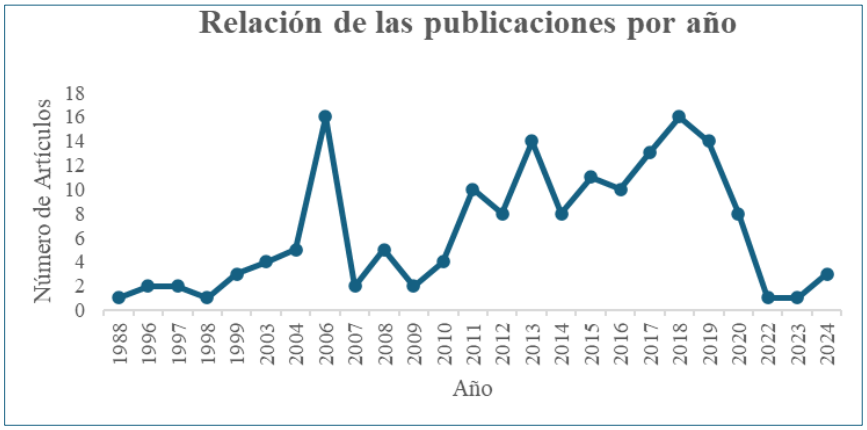


Figura 2. Distribución temporal de las publicaciones. Elaboración propia en base a la matriz global.

Las publicaciones provienen predominantemente de países como China, Brasil y Estados Unidos, con una contribución significativa de regiones con alta dependencia de sistemas agroforestales y dinámicas ambientales complejas **(Figura 3)**.

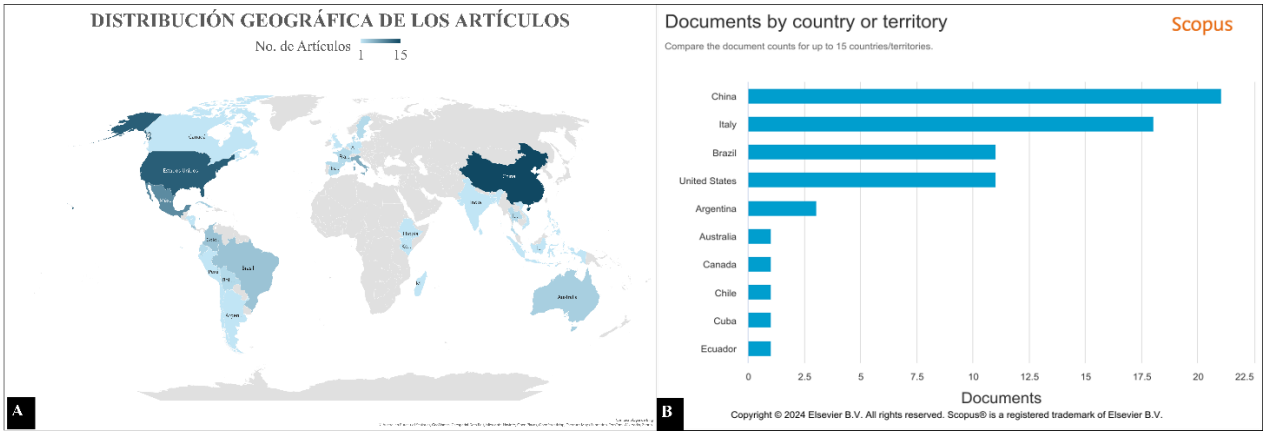


Figura 3. Distribución Geográfica de Publicaciones. **A.** Mapa generado bajo la matriz global, elaboración propia. **B.** Grafica generada por la función de Scopus.

En China, se destaca la investigación sobre la emergía en sistemas intensivos de cultivo y restauración ecológica. Brasil enfoca su producción en el análisis emergético de sistemas agroforestales y bioenergía, mientras que Estados Unidos lidera estudios de sostenibilidad emergética y metodologías de cálculo. Este panorama refleja la influencia del contexto socioeconómico y ambiental en la priorización de investigaciones.

Entre los autores más productivos y redes de colaboración destaca la contribución de investigadores como Sergio Ulgiati y Mark T. Brown, cuyos trabajos fundacionales sobre emergía y sostenibilidad siguen siendo ampliamente citados, como se evidencia en la **Figura 4**, la cual muestra la interacción entre autores, bien sea en citación o en colaboración entre ellos.

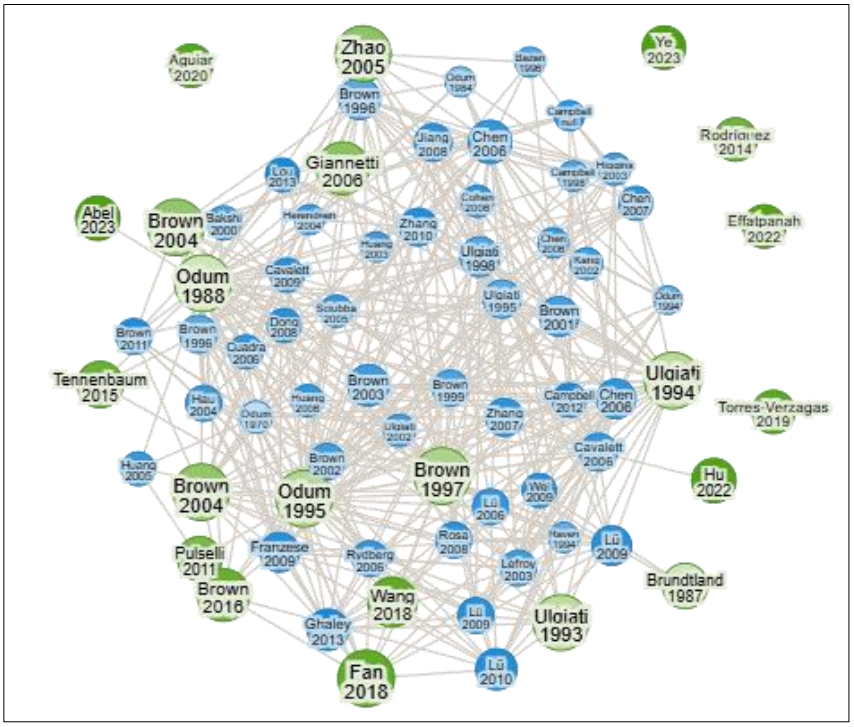


Figura 4. Red de autores. El color verde representa las publicaciones que tienen relación directa de los trabajos de los autores. El color azul, representa las relaciones secundarias con otros autores. Elaboración propia en Research Rabbit.

Las redes internacionales de autores evidencian conexiones fuertes entre investigadores de Asia, Europa y América, con colaboraciones frecuentes entre universidades chinas y brasileñas, como se muestra en la **Figura 5**. Además de Ulgiati y Brown, se reconoce a Hongfang Lü y Xiaohong Zhang como investigadores principales, quienes han colaborado en temas como la sostenibilidad emergética, flujos de nutrientes y evaluación de sistemas agrícolas. Estas conexiones también involucran a investigadores como Margarita Cuadra y Torbjörn Rydberg, centrados en la eficiencia hídrica y sistemas acuícolas, a Linjun Li y Daniel Campbell, que destacan en simulaciones y escenarios de sostenibilidad. Estas redes reflejan una fuerte interdisciplinariedad y un enfoque global en el análisis emergético aplicado a diferentes contextos ambientales y tecnológicos. Estas redes tienden a formarse en torno a temas específicos, como el desarrollo de metodologías de cálculo emergético y la evaluación de sostenibilidad en sistemas agrícolas, destacando un enfoque en fortalecer las bases teóricas y metodológicas del campo.

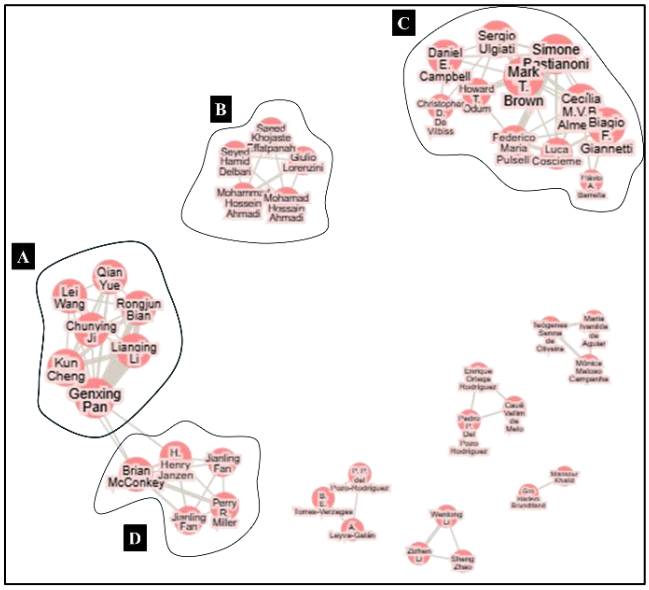


Figura 5. Grupos de trabajo de autores agrupados por las categorías especificadas. A. Flujos de energía; B. Flujos de materia; C. Eficiencia energética del sistema D. Índice de Sostenibilidad Emergética. Elaboración propia en Research Rabbit.

Partiendo de estas interacciones, se identifica que según la categorización, existe una fuerte concentración en los flujos de materia (FM1: Ciclo de nutrientes) y la sostenibilidad emergética (SE3: Índice de Sostenibilidad Emergética), mientras que áreas como flujos de energía y modelación muestran vacíos significativos, especialmente en MC3: Validación y simulación de escenarios, tal como se muestra en la **figura 6,** evidenciando los vacíos del conocimiento. Estas brechas reflejan una oportunidad para incorporar herramientas emergéticas en investigaciones más tecnológicas y dinámicas.

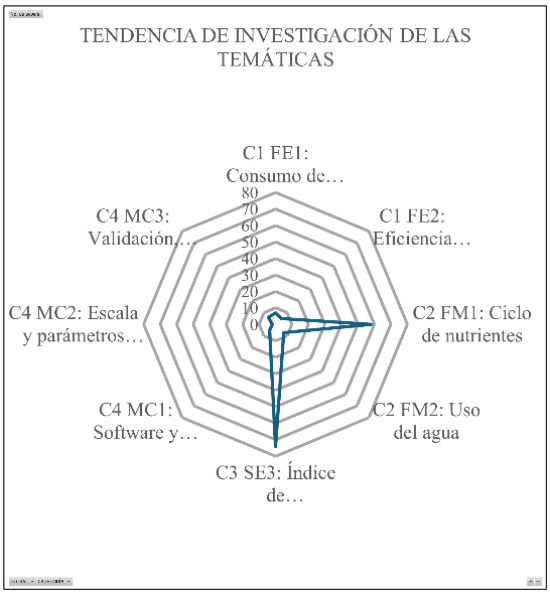


Figura 6. Diagrama radial de la tendencia de la información disponible de acuerdo con las categorías. Elaboración propia.

El análisis de los vacíos del conocimiento revela áreas poco exploradas dentro de las categorías establecidas. Por ejemplo, en los flujos de energía, se identifican escasas investigaciones sobre la dependencia de fuentes externas y la eficiencia energética en sistemas productivos localizados en ecosistemas específicos, como los sistemas agrícolas áridos o de alta montaña. También en la renovabilidad no se han aplicado ampliamente en sistemas diversificados, como los agroecosistemas mixtos de África subsahariana. Por su parte, en modelación, se evidencian vacíos en la validación y simulación de escenarios complejos, especialmente para ecosistemas como humedales tropicales y bosques secos o andinos. Estos vacíos subrayan la necesidad de integrar herramientas avanzadas y enfoques emergéticos detallados en contextos diversos, fortaleciendo la aplicabilidad del análisis emergético en sistemas productivos globales.

7.2. MODELACIÓN DE SAF Y MON

Para responder al objetivo 2, se diseñó un modelo matemático basado en los principios de la contabilidad emergética, el cual permite cuantificar el flujo de recursos hacia los sistemas agroproductivos bajo estudio. Las variables de entrada (kg/ha, L/ha, m^3/ha) fueron convertidas a una unidad común de análisis —la emergía solar equivalente (seJ)— mediante factores de transformidad obtenidos de literatura especializada. Con estos datos se estructuró un balance de entradas y se calcularon los indicadores ICSE (EYR, ELR, ESI), fundamentales para evaluar la sostenibilidad emergética relativa entre los modelos comparados. El modelo fue implementado en una hoja de cálculo automatizada y los cálculos desarrollados en R Studio, permitiendo visualizar los resultados y realizar comparaciones entre el sistema agroforestal (SAF) y el monocultivo (MON). Dado que las condiciones ecológicas fueron constantes entre los sistemas, se aplicó un único valor de factor de corrección para ajustar las variables BT, AR y FA, y los valores resultantes se utilizaron en todos los modelos. Esto permitió ajustar las variables clave de forma coherente sin

introducir variabilidad artificial en condiciones que el modelo no pretende modificar. Se muestra el resultado de *f* a continuación:

Variable	Unidad	Valor	Codificación C_i
PR	mm	114,40	0
CRA	%	13,39	1
MO	%	9,56 (MON) 12,42 (SAF)	1
TM	°C	18,79	1
HR	%	77,30	1
RS	cal/cm²	267,20	1
Factor de corrección MON(f)			0,83
Factor de corrección SAF			1,00 FA - 30%

Tabla 11. Resultado del factor de corrección. Elaboración propia con base en resultados del modelo matemático emergético.

Las variables ajustadas se muestran en la siguiente tabla.

Variable	Unidad	Valor esperado MON_CAFE	Valor ajustado MON_CAFE	Valor esperado MON_MAIZ	Valor ajustado MON_MAIZ	Valor esperado MON_FRIJOL	Valor ajustado MON_FRIJOL	Valor esperado SAF	Valor ajustado SAF
BT	t/ha	4.00	7.32	10.00	18.30	5.50	10.07	9.50	19
AR	m³/ha	7500.00	13,725.00	7000.00	12,810.00	4000.00	7,320.00	5525.00	3867.49
FA_N	kg/ha	217.39	397.82	326.09	596.74	50.00	91.50	71.25	49.87
FA_DAP	kg/ha	108.70	198.92	130.43	238.69	41.70	76.31	73.03	51.12
FA_MOP	kg/ha	195.70	358.13	260.90	477.45	66.70	122.06	134.78	94.34

Tabla 12. Presentación de Datos Ajustados de las variables . Elaboración propia.

Luego del ajuste, como bien se especificó en la metodología, se realizan las conversiones a *seJ* obteniendo los siguientes valores de transformidad:

Sistema	BT (seJ)	AR (seJ)	FA_N (seJ)	FA_DAP (seJ)	FA_MOP (seJ)	seJ total
MON_CAFE	13.176×10^{9}	0.250×10^{9}	2.542×10^{12}	2.069×10^{12}	2.937×10^{12}	7.561×10^{12}
MON_MAIZ	32.940×10^{9}	0.233×10^{9}	3.813×10^{12}	2.482×10^{12}	3.915×10^{12}	10.244×10^{12}
MON_FRIJOL	18.126×10^{9}	0.133×10^{9}	0.585×10^{12}	0.794×10^{12}	1.001×10^{12}	2.397×10^{12}
SAF	3.42×10^{10}	7.04×10^{7}	3.19×10^{11}	5.32×10^{11}	7.74×10^{11}	1.66×10^{12}

Tabla 13. Transformidades de los valores ajustados. Elaboración propia con base en los valores ajustados y transformidades reportadas por Odum (1996), Ortega et al. (2002) y Brown & Ulgiati (2004).

7.3.CÁLCULO DE LOS ICSE

A partir de los valores emergéticos obtenidos en la simulación matemática para cada sistema productivo, se procedió al cálculo de los Índices Clave de Sostenibilidad Emergética (ICSE), con el fin de comparar su desempeño relativo en términos de eficiencia energética y presión ambiental. Los resultados incluyen el porcentaje de recursos renovables utilizados (%R), la razón de rendimiento emergético (EYR), el índice de carga ambiental (ELR) y el índice de sostenibilidad emergética (ESI), siguiendo las fórmulas propuestas por Odum (1996) y Ulgiati y Brown (1998). La siguiente tabla resume los indicadores obtenidos para los cuatro modelos analizados.

Sistema	%R	EYR	ELR	ESI
MON_CAFE	0.17	1.00	572.84	0.00
MON_MAIZ	0.32	1.00	309.98	0.00
MON_FRIJOL	0.76	1.01	131.27	0.01
SAF	0.02	1.02	47.49	0.02

Tabla 14. Valores para los ICSE de acuerdo con las unidades de *seJ* obtenidas. Elaboración propia

7.4.Algoritmo heurístico

El diagrama presentado corresponde al algoritmo de decisión aplicado en la Fase 3, el cual permite emitir una recomendación sobre la viabilidad de la transición hacia sistemas agroforestales con base en los indicadores ICSE. A partir del ingreso de los valores calculados para cada sistema, el algoritmo compara cada indicador con su parámetro crítico y clasifica los resultados como favorables, condicionales o no favorables. Luego, se evalúa la combinación de estas clasificaciones: si al menos cuatro indicadores son favorables, se recomienda la transición inmediata; si hay dos o más condicionales, se recomienda con ajustes; y si se presentan dos o más no favorables, no se recomienda la transición. Esta lógica condicional garantiza una decisión estructurada, replicable y basada en evidencia cuantitativa.

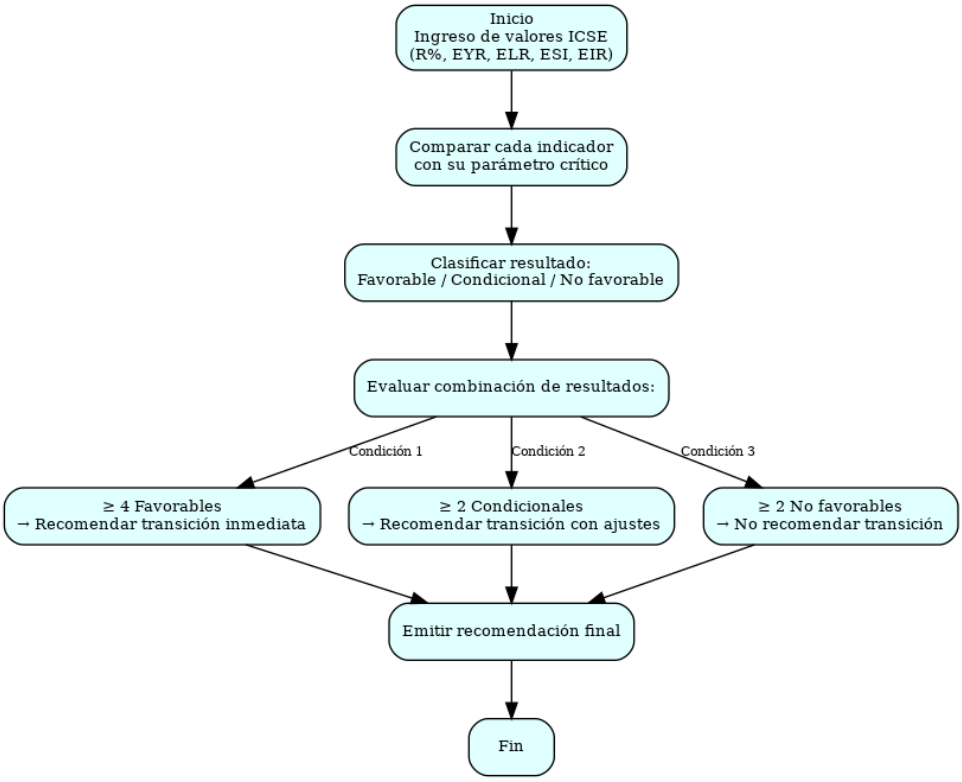


Figura 7. Diagrama a de flujo del Algoritmo, elaboración propia.

8. DISCUSIÓN

El análisis cienciométrico y los vacíos de conocimiento

El análisis cienciométrico realizado permitió identificar tendencias clave y vacíos de conocimiento en el ámbito de la sostenibilidad emergética aplicada a sistemas agroforestales (SAF) y monocultivos convencionales, con énfasis en regiones subandinas. A partir de la revisión de más de 100 documentos, se analizó la evolución temporal, los autores más influyentes, las redes de colaboración y los conceptos centrales que han guiado la investigación en esta área.

La distribución de las publicaciones a lo largo del tiempo evidenció un aumento sostenido desde el año 2000, con un notable incremento en el periodo entre 2015 y 2020, coincidiendo con una mayor atención global hacia la sostenibilidad y la mitigación de impactos ambientales en la agricultura (Ferreira et al., 2010; Martínez, 2017). Este incremento refleja una creciente necesidad de herramientas como el análisis emergético para evaluar la eficiencia y sostenibilidad de sistemas productivos. Sin embargo, la producción científica en años recientes ha mostrado una concentración geográfica: Brasil, Estados Unidos y China lideran las publicaciones en el tema, lo que limita la representación de ecosistemas como los subandinos (Brown & Ulgiati, 2004; Zhao et al., 2005).

En términos de autores, se destacaron autores como Howard T. Odum, pionero en el análisis emergético, y más recientemente, investigadores como Casanova et al. (2014), quienes han aplicado este enfoque a contextos agroforestales específicos. Instituciones como la Universidad de

São Paulo y el CIAT emergieron como líderes en publicaciones relacionadas con SAF y análisis emergético, mientras que revistas como *Ecological Modelling* y *Agricultural Systems* se posicionaron como plataformas clave para la difusión de este conocimiento. La relación entre autores e instituciones mostró redes de colaboración bien establecidas, aunque centradas principalmente en ecosistemas tropicales y con menor atención a zonas de transición como los ecosistemas subandinos.

En cuanto a las temáticas relacionadas, los términos más destacados incluyeron "análisis emergético", "sistemas agroforestales" y "eficiencia energética". Sin embargo, el análisis de los resultados también reveló vacíos importantes. Por ejemplo, aunque los sistemas agroforestales son reconocidos como una práctica sostenible (Illescas et al., 2020; Zhao et al., 2005), la literatura revisada carece de estudios aplicados a cultivos intercalados específicos como café, maíz y fríjol en regiones subandinas. Además, no se han explorado suficientemente las interacciones entre indicadores emergéticos clave, como el Índice de Rendimiento Emergético (EYR) y la Razón de Intercambio Emergético (EER), en estos sistemas.

Este vacío de conocimiento subraya la pertinencia de este trabajo, que busca no solo evaluar la sostenibilidad de estos sistemas productivos, sino también aportar al diseño de modelos que permitan analizar y comparar la sostenibilidad emergética en contextos subandinos. Aunque no es posible cubrir todos los aspectos de este vacío, este estudio contribuye a sentar las bases para investigaciones futuras, enfocadas en integrar el análisis emergético con modelos y prácticas agrícolas adaptativas.

Finalmente, los resultados del análisis cienciométrico permiten concluir que, si bien el análisis emergético es una herramienta prometedora y ampliamente aplicada en agroecosistemas, su potencial en entornos subandinos permanece inexplorado. Este trabajo aporta a la academia no solo al identificar estas brechas, sino también al proponer estrategias para abordar las complejidades de la transición de monocultivos a SAF intercalados, lo que refuerza su relevancia en el marco de la sostenibilidad agrícola y la gestión ambiental.

La modelación matemática y los flujos de energía

La aplicación de un modelo matemático emergético permitió evidenciar cómo las condiciones climáticas y edáficas, aunque frecuentemente tratadas como contexto estático, pueden ejercer una influencia directa sobre los flujos de energía en los sistemas productivos. La codificación ecológica y el ajuste proporcional de variables como la biomasa generada, el uso de fertilizantes y el agua de riego demostraron que incluso diferencias modestas en precipitación, materia orgánica o capacidad de retención de agua pueden generar respuestas diferenciadas en el desempeño energético de los cultivos. Estos hallazgos son consistentes con lo planteado por Ramos Cantillo et al. (2019), quienes documentan cómo tales variables afectan la eficiencia fisiológica y la productividad en modelos como AquaCrop. En el caso particular del sistema SAF, el ajuste matemático redujo significativamente los flujos de insumos no renovables, lo que se tradujo en valores más equilibrados de emergía, aunque sin eliminar del todo la carga ambiental asociada. Esta observación concuerda con los planteamientos de Brown y Ulgiati (2004), para quienes la sostenibilidad energética no solo depende del volumen de recursos utilizados, sino también de su calidad energética y de su integración funcional en el ecosistema productivo.

Para mejorar la representación de los flujos de energía, materia y servicios ecosistémicos en los sistemas analizados, se utilizaron diagramas de Sankey siguiendo los lineamientos metodológicos de Luft (2018) y de Sanz (2008), priorizando la claridad visual y la trazabilidad de cada insumo hasta su transformación productiva. Estos diagramas permiten observar la estructura del sistema, la distribución relativa de los flujos y la eficiencia emergética, facilitando así el análisis comparativo entre sistemas agroforestales y monocultivos bajo condiciones equivalentes.

El diagrama de Sankey correspondiente al sistema agroforestal (SAF) evidencia una estructura energética balanceada que permite visualizar con claridad la interacción entre flujos ecológicos y técnicos dentro del agroecosistema (Figura 8). El nodo Suelo, que integra insumos renovables como la radiación solar (267), la precipitación (114) y la materia orgánica reciclada ($1{,}19 \times 10^{12}$ seJ), representa el capital natural que sostiene la producción vegetal. Esta energía ecológica es transferida directamente a la fase de Producción, aportando un flujo real que complementa los insumos externos. De acuerdo con Ramos Cantillo et al. (2019), variables como la materia orgánica y la precipitación no solo condicionan el contexto, sino que inciden funcionalmente en la eficiencia hídrica y en la capacidad del suelo para sostener cultivos, lo cual justifica su inclusión en el modelo como insumos activos. En términos emergéticos, Odum (1996) subraya que los sistemas sostenibles son aquellos que logran aprovechar eficazmente las fuentes renovables antes de recurrir a recursos externos.

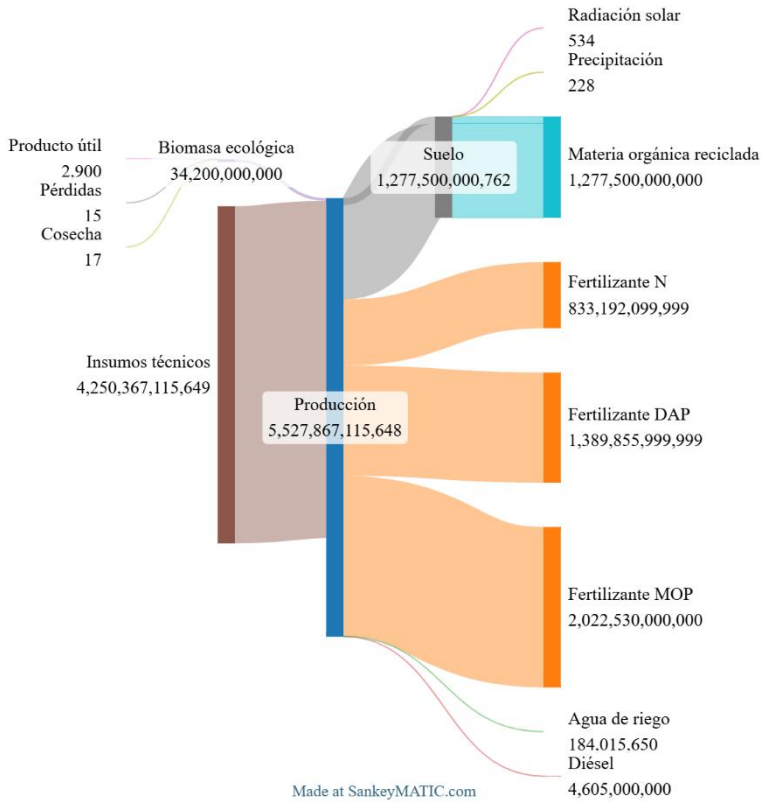


Figura 8. Diagrama de Sankey para el sistema de SAF. Elaboración propia.

No obstante, el SAF continúa dependiendo de insumos técnicos como fertilizantes (N, DAP, MOP), agua de riego (10.111 m^3) y diésel, que en conjunto representan más de $4{,}25 \times 10^{12}$ seJ, es decir, aproximadamente el 78 % del total energético que ingresa al sistema. Este patrón es coherente con

los planteamientos de Pulselli et al. (2011), quienes advierten que la presencia de altos flujos de energía importada reduce la autonomía sistémica, incluso en modelos ecológicos avanzados. Sin embargo, esta dependencia se ve parcialmente compensada por una mayor eficiencia en la conversión de flujos ecológicos en biomasa productiva: el nodo de Biomasa ecológica muestra un valor de $3{,}42 \times 10^{10}$ seJ, que se canaliza principalmente hacia producto útil (2900 unidades físicas), con solo 15 unidades en pérdidas, lo que refleja un metabolismo productivo altamente funcional.
Desde un enfoque emergético, este balance indica que el SAF no ha alcanzado aún la autosuficiencia energética, pero sí representa un sistema en transición hacia una mayor sostenibilidad, donde los flujos ecológicos ganan protagonismo en la dinámica productiva. Según Ulgiati y Brown (1998), los sistemas agroecológicos sostenibles son aquellos que logran reducir la presión ambiental sin sacrificar productividad, y en este caso, la distribución eficiente de la biomasa y la integración funcional del suelo respaldan esa afirmación. En conjunto, el diagrama no solo representa los flujos cuantificados, sino que valida visual y estructuralmente la coherencia del modelo matemático emergético construido en esta investigación.

El diagrama de Sankey correspondiente al monocultivo de café (Figura 9) revela una estructura energética altamente dependiente de insumos técnicos, con escasa integración de flujos ecológicos. El nodo Suelo recibe únicamente $8{,}75 \times 10^{10}$ seJ de materia orgánica reciclada, cifra considerablemente inferior a la del sistema SAF, lo cual refleja una falta de retroalimentación energética interna, característica común en esquemas convencionales de producción (Odum, 1996; FAO, 2012). Aunque el sistema también incorpora radiación solar y precipitación como entradas simbólicas, estas no se traducen en flujos energéticos significativos, lo que limita su funcionalidad biogeoquímica (Pulselli et al., 2011).

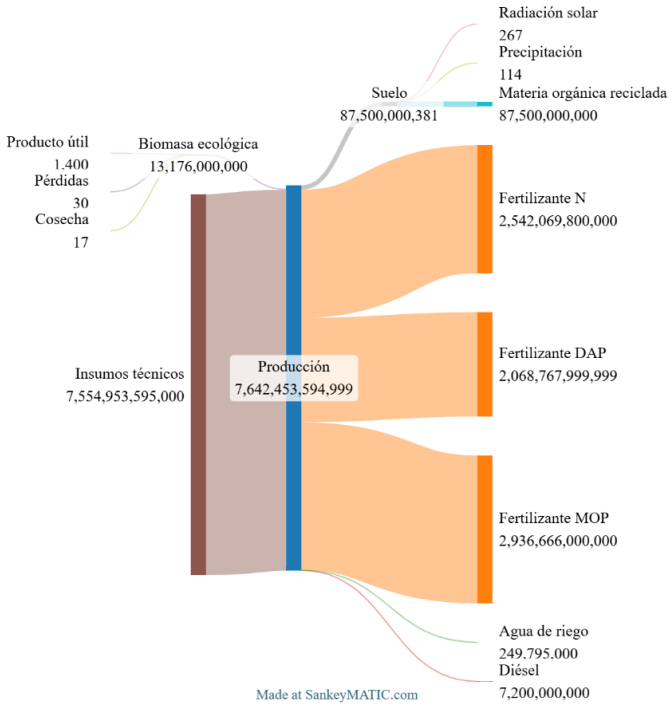


Figura 9. Diagrama de sankey para el monocultivo de café. Elaboración propia.

La biomasa generada alcanza $1{,}32 \times 10^{10}$ seJ, un valor bajo si se considera que la Producción depende en un 98 % de energía exógena, representada en fertilizantes, riego y diésel. Los fertilizantes, en particular, superan los 7×10^{12} seJ, siendo los flujos más intensos del sistema, lo cual genera un desbalance energético crítico (Brown & Ulgiati, 2004; Luft, 2018). Esta relación se alinea con lo reportado por Illescas et al. (2020), quienes advierten que los cultivos con alta carga de insumos presentan menor rendimiento emergético relativo, aun cuando las pérdidas aparentes sean mínimas. En el presente caso, las pérdidas de biomasa se limitan a 30 unidades físicas, pero a costa de un consumo energético desproporcionado, lo que reduce la eficiencia transformativa del sistema (Steduto et al., 2009).

En el caso de monocultivo de maíz evidencia un sistema altamente dependiente de insumos técnicos, con una participación secundaria de flujos ecológicos. El nodo Suelo recibe un total de 486 gigaseJ, compuesto por entradas simbólicas de radiación solar (267) y precipitación (114), junto con un valor real de materia orgánica reciclada (105). Esta cifra es apenas superior a la del sistema de café (87,5), pero significativamente inferior al SAF (1190), lo cual indica que la base ecológica del maíz es funcional, pero limitada en capacidad de retroalimentación energética. Según Ramos Cantillo et al. (2019), este tipo de comportamiento es típico de cultivos que, aunque generan mayor volumen de biomasa, no necesariamente mejoran su eficiencia ecosistémica si no integran mecanismos efectivos de reciclaje y cobertura del suelo.

El nodo Producción acumula 5689 gigaseJ, de los cuales 5585 provienen de insumos técnicos, representando más del 98 % del total, una proporción idéntica a la del café. Entre estos insumos destacan los fertilizantes N, DAP y MOP, que juntos superan los 5500 gigaseJ, ratificando que el modelo productivo del maíz sigue siendo altamente industrializado, a pesar de su potencial agroecológico. Esta configuración confirma lo expuesto por Pulselli et al. (2011) y Steduto et al. (2009), quienes argumentan que el maíz es uno de los cultivos más sensibles a la intensificación técnica, especialmente en términos de fertilización y dependencia hídrica. La contribución del agua de riego es mínima (redondeada a cero en la escala visual), pero su presencia sigue siendo fundamental en la dinámica productiva del maíz en zonas subandinas (FAO, 2012).

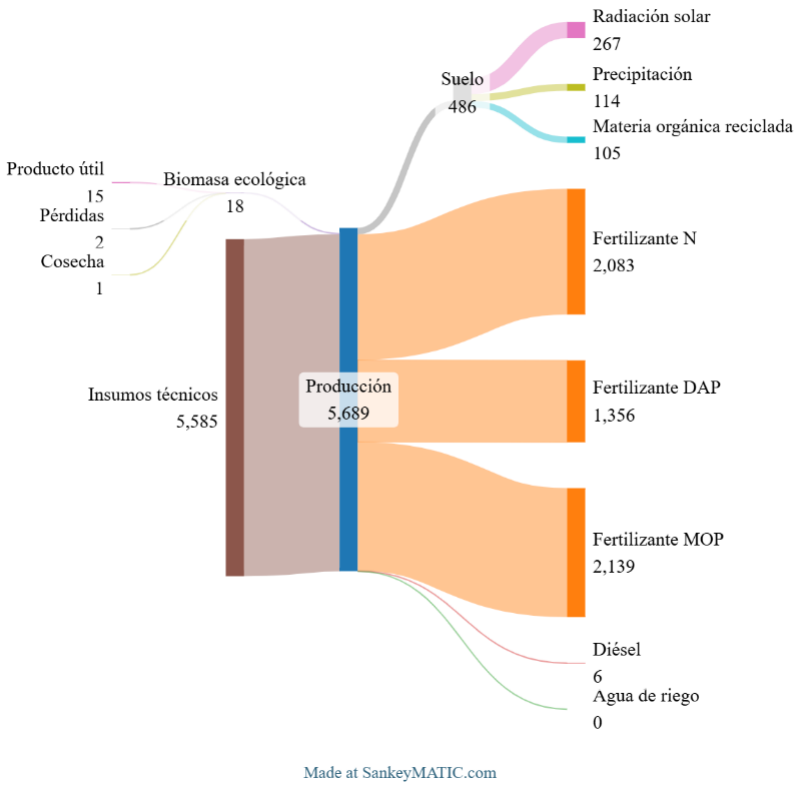


Figura 10. Grafica de Sankey para el monocultivo de maíz.

La biomasa ecológica generada alcanza solo 18 gigaseJ, muy por debajo del volumen de insumos aplicados. Esta desproporción refleja un sistema con baja eficiencia emergética, en el que grandes volúmenes de energía externa apenas se traducen en incrementos moderados de productividad. Según Ulgiati y Brown (1998), este tipo de patrón se asocia con un bajo valor del Índice de Sostenibilidad Emergética (ESI), dado que el sistema no logra capitalizar sus recursos renovables internos y presenta una alta carga ambiental relativa (ELR alto). Las salidas desde la biomasa —15 para producto útil, 2 en pérdidas y 1 en cosecha— muestran una buena distribución funcional, pero no compensan el enorme esfuerzo energético requerido para sostener la producción, lo cual compromete la sostenibilidad a mediano plazo (Martín & Coronel, 2023).

Siguiendo con el monocultivo de frijol, el diagrama evidencia un comportamiento intermedio entre los demás sistemas de monocultivo analizados, tanto en términos de carga emergética como de eficiencia productiva. El nodo Suelo acumula un total de 315 gigaseJ, valor derivado de la incorporación de 900 kg/ha de materia orgánica reciclada, que supera al café (250 kg/ha) y al maíz (300 kg/ha), pero se mantiene lejos del sistema agroforestal (3400 kg/ha). Esta diferencia en el reciclaje interno refleja lo planteado por Ramos Cantillo et al. (2019), quienes destacan que el frijol, como cultivo de ciclo corto, tiene mayor potencial de asociación con prácticas de cobertura y abonos verdes, aunque su integración aún no alcanza niveles óptimos de autorregulación ecológica.

El nodo Producción recibe un total de 2384 gigaseJ en insumos técnicos, lo cual representa un valor menor que en los sistemas de maíz (5585) y café (7555), pero sigue siendo desproporcionadamente superior al aporte del suelo. Entre los insumos aplicados destacan los fertilizantes, que en conjunto superan los 2300 gigaseJ, con una presencia especialmente alta del fertilizante MOP (1000 gigaseJ). Esta estructura confirma que el frijol, aunque menos intensivo en agroquímicos, continúa funcionando bajo un modelo técnico dominante, similar al de los demás monocultivos. Como advierten Pulselli et al. (2011), incluso cultivos de baja demanda fisiológica pueden mostrar una alta carga emergética cuando se gestionan en esquemas lineales y desconectados de su entorno ecológico. De igual forma, FAO (2012) enfatiza que los sistemas leguminosos no son automáticamente sostenibles si no integran mecanismos reales de manejo del suelo y del agua.

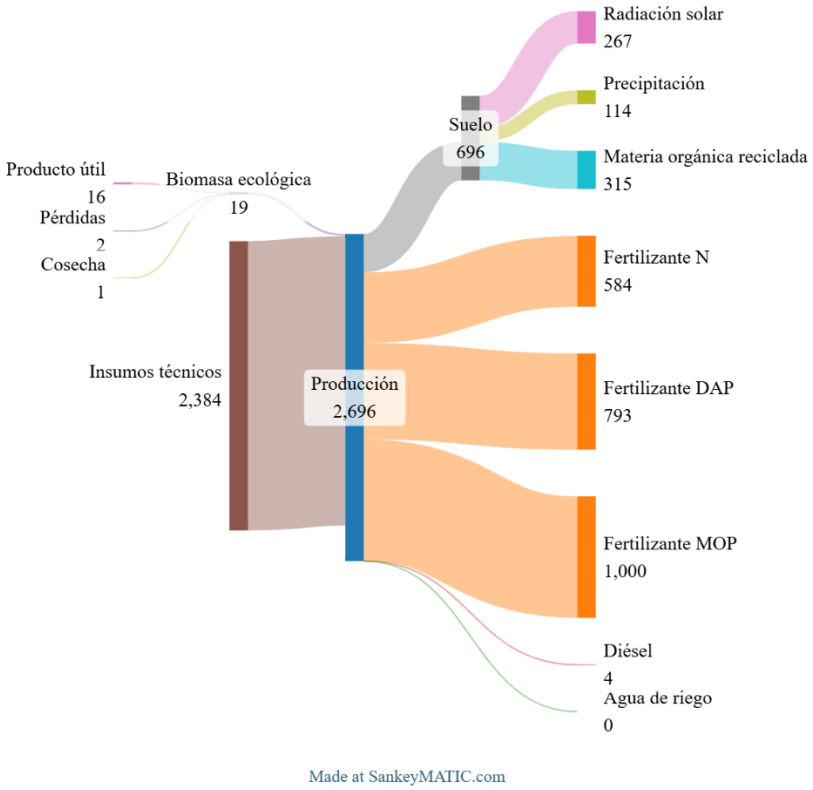


Figura 11. Monocultivo de Frijol expresado en diagrama de Sankey

La biomasa generada se representa con 18 gigaseJ, distribuida proporcionalmente en producto útil (16), pérdidas (2) y cosecha simbólica (1), lo que indica un buen nivel de eficiencia transformativa relativa. Esta eficiencia, sin embargo, no se traduce en sostenibilidad energética, ya que la producción sigue sustentada en flujos importados. En este sentido, el frijol se comporta de forma más eficiente que el café (13 GseJ), pero con insumos aún elevados, lo que limita su renovabilidad. Según Ulgiati y Brown (1998), este tipo de sistema puede presentar un EYR aceptable, pero mantiene un ELR alto y un ESI bajo, debido a la escasa capacidad de cerrar sus ciclos metabólicos. Además, la carga emergética asociada al fertilizante potásico confirma lo señalado por Martín y Coronel (2023), quienes identifican en el uso de MOP una fuente crítica de presión ambiental no renovable en los sistemas agrícolas intensivos.

El análisis conjunto de los diagramas de Sankey permite establecer una comparación estructural y funcional entre los cuatro sistemas evaluados. El sistema agroforestal (SAF) demostró una integración superior de flujos renovables, evidenciada en una mayor biomasa generada con un menor volumen de insumos técnicos, así como una base ecológica más robusta sustentada en reciclaje de materia orgánica (3400 kg/ha) y un aprovechamiento eficiente de la precipitación y radiación solar. En contraste, los monocultivos de café y maíz revelaron una estructura energética lineal, altamente dependiente de fertilizantes y agua de riego, con bajos niveles de retroalimentación interna, lo que confirma las limitaciones de sostenibilidad señaladas por Casanova et al. (2014) y Grigoroudis, Kouikoglou y Phillis (2024). Aunque el maíz mostró un volumen de biomasa transformada ligeramente superior al café (18 vs. 13 GseJ), esto se logró a costa de un incremento significativo en insumos externos, lo que eleva su carga emergética y lo posiciona como un sistema vulnerable y dependiente, tal como advierten Pulselli et al. (2011) y Ulgiati y Brown (1998).

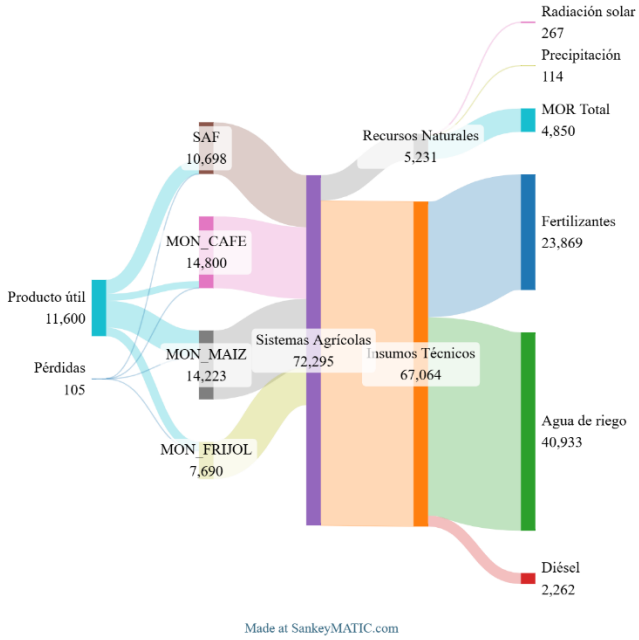


Figura 12. Diagrama de Sankey consolidados para los cuatro sistemas de producción

El sistema de frijol, por su parte, se comportó como un modelo intermedio: mostró menores requerimientos energéticos que café y maíz, con una distribución de insumos más equilibrada, pero aún insuficiente para sostener una estructura ecológica autoregulada. Aunque incorporó más materia orgánica que los otros monocultivos (900 kg/ha), su dependencia de fertilizantes persistió, especialmente del MOP, cuya alta transformidad representa un punto crítico en la eficiencia sistémica (Martín & Coronel, 2023). Frente al SAF, que logró canalizar más del 25 % de sus flujos totales desde fuentes ecológicas, el frijol aún mantiene un patrón energético subordinado al modelo agroindustrial.

En los cuatro sistemas, el aporte emergético del diésel resultó bajo en términos relativos, debido a su escasa cantidad aplicada por hectárea (entre 76 y 120 L/ha), lo que explica su baja representación

gráfica. Esta observación concuerda con lo señalado por Odum (1996) y Brown y Ulgiati (2004), quienes destacan que, a pesar de su elevada transformidad, los combustibles fósiles representan un menor porcentaje de carga emergética total cuando se comparan con insumos como fertilizantes y agua de riego. En conjunto, el análisis evidencia que la transición hacia sistemas agroforestales no solo mejora los indicadores ICSE, sino que permite reducir la dependencia de recursos no renovables, optimizar el reciclaje interno y aumentar la resiliencia ecosistémica. Esta transformación no puede lograrse únicamente con reducciones cuantitativas en insumos, sino mediante un rediseño sistémico basado en flujos cerrados, diversidad funcional y eficiencia transformativa, tal como lo proponen FAO (2012) y Steduto et al. (2009).

El diagrama Sankey consolidado permite comparar, de forma clara y proporcional, el comportamiento emergético de los cuatro sistemas analizados (SAF, MON_CAFE, MON_MAIZ y MON_FRIJOL), tomando como punto de partida una base común de recursos naturales y la intensidad del uso de insumos técnicos. La estructura del gráfico evidencia la distribución diferenciada de energía entre los sistemas, y cómo esta se traduce en producto útil o pérdidas, en términos de eficiencia transformativa.

El nodo de Recursos Naturales (5231 unidades) alimenta el conjunto de los sistemas, destacando que el SAF es el único que canaliza una proporción significativa de esta energía (3400 kg/ha de materia orgánica, más radiación y precipitación), mientras que los sistemas de monocultivo presentan flujos muy reducidos en este componente. Esta observación se alinea con los planteamientos de Casanova et al. (2014) y Ramos Cantillo et al. (2019), quienes afirman que la sostenibilidad agroecológica requiere no solo minimizar insumos, sino fortalecer la funcionalidad del entorno edáfico y climático. En contraste, el nodo de Insumos Técnicos (67.064 unidades) revela una marcada dependencia de los monocultivos, siendo el café y el maíz los que concentran los valores más altos (14.800 y 14.223 respectivamente), mientras que el frijol mantiene una menor carga técnica, aunque aún significativa (7690). Esto confirma la lógica de funcionamiento lineal y dependiente del modelo agroindustrial (Brown & Ulgiati, 2004; Martín & Coronel, 2023).

La distribución hacia el nodo Producto útil sintetiza la eficiencia energética relativa: el SAF, con menos energía de insumos, logra un rendimiento similar o incluso superior al resto (2900 kg/ha), mientras que el maíz, si bien genera más biomasa (5500 kg/ha), requiere el doble de recursos externos, resultando en un sistema menos eficiente y más vulnerable. La franja correspondiente al frijol, aunque más delgada, muestra un perfil intermedio: produce bien con menos, pero aún sin cerrar del todo sus ciclos. Como lo señala Ulgiati y Brown (1998), un sistema sostenible no es aquel que maximiza su producción, sino el que equilibra adecuadamente entradas y salidas, minimizando cargas externas.

El nodo de Pérdidas, común a todos los sistemas (30 unidades en promedio), permite identificar que la eficiencia transformativa no radica solo en cuánto se pierde, sino en cuánta energía se requiere para generar lo que se conserva. En este sentido, el SAF exhibe un desempeño sobresaliente, convirtiéndose en una alternativa realista y necesaria para mejorar la resiliencia agroecológica de las regiones subandinas. Como resume Grigoroudis, Kouikoglou y Phillis (2024), la clave de la sostenibilidad no está en el volumen producido, sino en la capacidad de los sistemas

de retroalimentarse, autorregularse y adaptarse a condiciones cambiantes. El gráfico, por tanto, no solo ilustra flujos de energía, sino que revela decisiones estratégicas: continuar con monocultivos implica una dependencia técnica creciente y una presión ambiental insostenible; transitar hacia agroforestería significa eficiencia, autonomía y sostenibilidad a largo plazo.

La emergía desde los ICSE

Los valores bajos del Índice de Sostenibilidad Emergética (ESI) obtenidos en todos los sistemas analizados reflejan una marcada dependencia de insumos técnicos no renovables, en particular fertilizantes y agua de riego, en contraste con una generación relativamente baja de biomasa útil. Este comportamiento es coherente con lo reportado por Brown y Ulgiati (2004), quienes advierten que los agroecosistemas intensivos en insumos, aunque puedan presentar rendimientos físicos elevados, suelen presentar balances emergéticos desfavorables por su alta carga ambiental y su escasa capacidad de autorregulación.

Asimismo, la proporción de recursos renovables utilizada en los cuatro modelos (%R) fue consistentemente baja, incluso en el sistema SAF, lo que pone en evidencia los límites estructurales de la sostenibilidad agrícola en contextos donde las prácticas convencionales de manejo aún predominan. Esta baja renovabilidad, que en ningún caso superó el 35 %, pone en tensión la idea de autosuficiencia energética y resalta la urgencia de implementar estrategias de diversificación, integración ecológica y cierre de ciclos internos. Como lo plantea Odum (1996), la sostenibilidad real de un sistema agrícola no puede medirse únicamente por su producción final, sino por la proporción de energía que proviene de fuentes renovables y por la capacidad del sistema para mantener su metabolismo sin depender de flujos externos.

El Índice de Carga Ambiental (ELR) y la Razón de Rendimiento Emergético (EYR) también aportaron evidencia clave para evaluar las trayectorias de transición posibles. Mientras que el SAF mantuvo un ELR por debajo de 2, los monocultivos superaron ampliamente este umbral, revelando una presión ambiental considerable asociada al uso intensivo de agroquímicos. En términos de EYR, aunque el sistema de maíz presentó una mejor relación entre emergía invertida y emergía generada, su alto uso de fertilizantes nitrogenados lo posiciona como un sistema ineficiente desde una perspectiva emergética total. Estos resultados coinciden con los hallazgos de Steduto et al. (2009) y Pulselli et al. (2011), quienes señalan que los sistemas agrícolas convencionales tienden a mostrar indicadores de rendimiento aceptables, pero a costa de aumentar su fragilidad ambiental y económica.

En conjunto, los ICSE revelan que los sistemas analizados se encuentran en una situación crítica de sostenibilidad. El modelo emergético desarrollado no solo cuantificó diferencias entre escenarios, sino que permitió evidenciar tensiones estructurales entre eficiencia productiva, presión ambiental y dependencia tecnológica. Esto valida el uso de los ICSE como herramientas de diagnóstico sistémico que, más allá de informar sobre el desempeño actual, ofrecen un marco cuantitativo para orientar procesos de transformación agroecológica.

De esta forma, se confirma que la transición hacia sistemas más sostenibles, como el agroforestal, no puede sustentarse únicamente en cambios incrementales de insumos, sino que requiere una reconfiguración profunda del diseño metabólico del agroecosistema. Esta reconfiguración debe incorporar principios de ecología de sistemas (Odum, 1996), racionalidad energética (Ulgiati & Brown, 1998), y retroalimentación funcional (Grigoroudis, Kouikoglou & Phillis, 2024), con el fin

de promover un uso eficiente y regenerativo de los recursos. Bajo esta lógica, la emergía no solo actúa como medida de eficiencia, sino como lente estructural para rediseñar el sistema agrícola hacia una sostenibilidad real y verificable.

Los ICSE y su aplicación en contextos reales

El desarrollo y aplicación de un algoritmo decisional basado en los Indicadores Clave de Sostenibilidad Emergética (ICSE) constituye uno de los aportes metodológicos más significativos de este estudio, no solo por su capacidad para sintetizar información energética compleja, sino por su utilidad práctica para orientar decisiones en sistemas agrícolas reales. A diferencia de enfoques estáticos de sostenibilidad, centrados exclusivamente en productividad o rentabilidad económica, el algoritmo propuesto opera como una herramienta de evaluación sistémica, articulando múltiples dimensiones emergéticas —renovabilidad (%R), eficiencia energética (EYR), presión ambiental (ELR) y sostenibilidad integrada (ESI)— para emitir recomendaciones adaptativas. Esta aproximación responde a la necesidad de operacionalizar la teoría de la emergía en contextos donde las decisiones técnicas y territoriales requieren criterios concretos, transparentes y replicables (Ulgiati & Brown, 1998; Odum, 1996).

El valor de esta herramienta radica en su diseño estructurado a partir de principios axiomáticos de sostenibilidad, tal como lo proponen Grigoroudis, Kouikoglou y Phillis (2024), quienes afirman que un modelo decisional robusto debe basarse en fundamentos no negociables del sistema evaluado, como la capacidad de autorregulación, el balance entre entradas y salidas, y la minimización de cargas externas. En línea con esta lógica, el algoritmo elaborado clasifica a cada sistema como “favorable”, “condicional” o “no favorable” según el cumplimiento de parámetros críticos por cada indicador, definidos a partir de referencias empíricas ampliamente aceptadas (Brown & Ulgiati, 2004; Pulselli et al., 2011). Esta clasificación permite trascender la comparación numérica de valores individuales y avanzar hacia una lectura estructural del metabolismo agrícola, identificando umbrales funcionales que determinan la viabilidad energética de cada sistema.

En contraste con otros enfoques de decisión multicriterio presentes en la literatura —como los modelos tipo Analytic Hierarchy Process (AHP) o técnicas de decisión difusa (Semitiel García & Noguera Méndez, 2004)—, esta propuesta se diferencia por su anclaje biofísico explícito, lo que garantiza mayor objetividad y replicabilidad. Mientras que muchos instrumentos convencionales de evaluación de sostenibilidad dependen de ponderaciones subjetivas o criterios sociales, el algoritmo aquí planteado se construye exclusivamente a partir de flujos de energía transformada en seJ, asegurando que las decisiones estén basadas en las condiciones reales del sistema y no en percepciones. Esta característica resulta especialmente relevante en territorios como la región subandina, donde los sistemas agrícolas enfrentan límites ecosistémicos críticos y las decisiones deben guiarse por diagnósticos técnicos rigurosos (FAO, 2012; Martín & Coronel, 2023).

Los resultados obtenidos a partir de su aplicación demuestran su validez funcional: el sistema agroforestal (SAF) fue clasificado como favorable, cumpliendo con al menos cuatro indicadores en los rangos superiores de sostenibilidad, mientras que el frijol fue evaluado como condicional y los monocultivos de café y maíz como no sostenibles. Esta tipología no solo refleja los valores emergéticos obtenidos, sino que traduce las diferencias estructurales de los sistemas en decisiones operativas concretas, ofreciendo una hoja de ruta basada en evidencia. En este sentido, el algoritmo

actúa como un filtro técnico de gobernanza ambiental, orientando el tránsito hacia formas de producción que no solo sean productivas, sino energética y ecológicamente viables.
No obstante, es importante reconocer que esta herramienta tiene un alcance orientador, no prescriptivo. Si bien su estructura lógica facilita la toma de decisiones a escala predial o territorial, su eficacia depende de la calidad de los datos de entrada y de la pertinencia de los parámetros utilizados. Como advierte Casanova et al. (2014), la sostenibilidad no puede evaluarse desde una única perspectiva disciplinar, por lo que este algoritmo debe entenderse como parte de una estrategia más amplia de análisis transdisciplinar, donde confluyan criterios biofísicos, sociales y culturales.
En conclusión, la integración de los ICSE en un algoritmo decisional funcional representa un avance concreto en la aplicabilidad del pensamiento sistémico a la sostenibilidad agrícola. Su capacidad para traducir la lógica de la emergía en rutas de acción diferenciadas, con criterios claros y replicables, abre una oportunidad real para articular evaluación, planificación y transición en agroecosistemas de alta complejidad como los subandinos. Lejos de ser un ejercicio abstracto, esta herramienta proporciona un mecanismo operativo para hacer de la sostenibilidad una práctica medible y orientada al cambio estructural del metabolismo agrícola.

9. CONCLUSIONES

El análisis emergético se consolida como una metodología esencial para evaluar la sostenibilidad en sistemas productivos, ofreciendo una perspectiva holística que integra insumos renovables, servicios ecosistémicos y costos ambientales acumulados. Los resultados destacan que los SAF superan a los monocultivos convencionales en sostenibilidad, especialmente por su mayor dependencia de recursos renovables y su capacidad para proporcionar servicios ecosistémicos clave como la regeneración de nutrientes y la captura de carbono.
La presente investigación consolidó el análisis emergético como una herramienta fundamental para evaluar la sostenibilidad en sistemas agrícolas, particularmente en regiones subandinas. Desde una perspectiva integral, se comprobó que los sistemas agroforestales (SAF) ofrecen una mayor eficiencia en el uso de recursos renovables, una menor presión ambiental y una capacidad superior para generar servicios ecosistémicos clave, como la regeneración de nutrientes y la captura de carbono, en comparación con los sistemas de monocultivo. Estas ventajas no solo fueron cuantificadas a través de los Índices Clave de Sostenibilidad Emergética (ICSE), sino que también fueron representadas mediante modelos matemáticos que simularon de forma rigurosa los flujos de energía, materia y servicios en diferentes escenarios productivos.
El análisis cienciométrico evidenció una evolución significativa en el campo de la emergía aplicada a la sostenibilidad agrícola desde el año 2000. Se identificó una transición desde enfoques descriptivos hacia metodologías computacionales y sistémicas, orientadas a evaluar el comportamiento energético de sistemas complejos. A pesar de este avance, se constató un vacío geográfico y temático en la aplicación de estos enfoques en ecosistemas de transición como los bosques subandinos, los cuales, a pesar de su relevancia ecológica y productiva, han sido escasamente abordados en la literatura científica. La necesidad de ampliar la investigación en zonas como la región andina colombiana, particularmente en cultivos intercalados y modelos agroforestales, se torna evidente ante los desafíos del cambio climático y la degradación de suelos.

Desde la modelación desarrollada en este estudio, se comprobó que los monocultivos presentan una estructura energética lineal, altamente dependiente de insumos externos, con bajos niveles de reciclaje interno y una eficiencia emergética reducida. El SAF, en contraste, logró canalizar un mayor porcentaje de energía desde el entorno ecológico, con menor inversión técnica, mostrando un equilibrio más favorable entre entradas naturales y salidas productivas. Este comportamiento se reflejó claramente en los valores de los ICSE, donde el SAF fue el único sistema clasificado como "favorable" según los parámetros del algoritmo decisional desarrollado. Este algoritmo, construido a partir de principios axiomáticos de sostenibilidad energética, permitió traducir resultados técnicos complejos en recomendaciones claras y replicables para orientar transiciones agroecológicas en el territorio.

Finalmente, este trabajo demuestra que la transición hacia sistemas más sostenibles no puede lograrse únicamente mediante la sustitución de insumos o la mejora de prácticas aisladas, sino que requiere una transformación profunda en el diseño metabólico del agroecosistema. La combinación de análisis emergético, modelación matemática y lógica de decisión representa una contribución metodológica valiosa que puede ser adaptada a diferentes escalas y contextos productivos. En regiones como la subandina colombiana, esta propuesta ofrece una ruta concreta para reorientar la agricultura desde una lógica extractiva hacia una racionalidad energética regenerativa, alineada con los principios de la ecología de sistemas.

RECOMENDACIONES FUTURAS

El empleo de herramientas digitales como Research Rabbit, Scopus y Obsidian, en conjunto, optimizó la organización, análisis e identificación de patrones en grandes volúmenes de información. Estas tecnologías no solo facilitaron la detección de vacíos de conocimiento, sino también el análisis de redes de colaboración científica, aspectos fundamentales para dirigir futuras investigaciones hacia áreas prioritarias.

A partir de este trabajo, se recomienda profundizar en el desarrollo y validación empírica del algoritmo de transición propuesto, con el fin de convertirlo en una herramienta aplicable en escenarios reales de planificación territorial y toma de decisiones. Para ello, podrían integrarse datos provenientes de estudios de caso en campo, así como retroalimentación de actores locales y expertos en agroecología. De este modo, el modelo no solo serviría como instrumento de diagnóstico, sino como una guía operativa capaz de adaptarse a distintos contextos productivos y ecológicos.

Asimismo, se sugiere avanzar hacia plataformas digitales interactivas que permitan modelar escenarios agroecológicos en tiempo real, basadas en lógica emergética y principios de teoría de sistemas. Estas herramientas facilitarían la apropiación comunitaria del conocimiento técnico y fortalecerían la capacidad institucional para promover transiciones agroecológicas más eficientes, sostenibles y territorialmente pertinentes.

BIBLIOGRAFÍA

Acuña Velázquez, I.R., Ponce Vaca, L.A., Proaño Ponce, P., Orellana Suárez, K.D. "El sistema agroforestal cafetalero. Su importancia para la seguridad agroalimentaria y nutricional en Ecuador" ISSN: 1996–2452 RNPS: 2148 enero – abril. 2018 Vol. 6(1):116-129 http://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/300/

AGROSAVIA. (2021). Manejo técnico del cultivo de frijol en condiciones andinas de Colombia. https://repository.agrosavia.co/

AGROSAVIA. (2022). Definición de dosis de nitrógeno, fósforo y potasio para una máxima producción del maíz híbrido Advanta 9313 mediante el diseño central compuesto. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 23(1). https://revistacta.agrosavia.co/html/2225/

Aguas del Tequendama S.A E.S.P. (2025). Tarifas 2025. Recuperado de https://aguasdeltequendama.com/tarifas/

Akinnifesi, F. K., Ajayi, O.C., Sileshi, G., Chirwa, P.W., Chianu, J., 2010. Fertilizer trees for sustainable food security in the maize-based production systems of East and Southern Africa: a Review. Agronomy for Sustainable Development, Springer Verlag (Germany). 30 (3).

Arcila, J. (2007). Densidad de Siembra y productividad de los cafetales. Cenicafé. Sistemas de producción de café en Colombia. Cap 6. https://www.cenicafe.org/es/documents/LibroSistemasProduccionCapitulo6.pdf

Albino-Garduño, R., Turrent-Fernández, A., Cortés-Flores, J. I., Livera-Muñoz, M., & Mendoza-Castillo, M. C. (2015). Distribución de raíces y de radiación solar en el dosel de maíz y frijol intercalados. *Agrociencia, 49*(5), 513-531.

Alfonzo-Lopez, D., Bellon, S., & Tchamitchian, M. (2017). El diseño de sistemas agroforestales de cultivos intercalados templados: Interacciones competitivas y rendimiento de los cultivos. *Cadernos de Agroecologia, 13*(1). Recuperado de https://hal.inrae.fr/hal-03543726&#8203

Alvarado Reyes, A. J., Rosero Lasprilla, L., & Jara Muñoz, O. A. (2024). Estructura y composición florística de un bosque subandino en Togüí (Boyacá, Colombia). *Biota Colombiana*, *25*, e1202. https://doi.org/10.21068/2539200X.1202

Altieri, Miguel A. (1999). AGROECOLOGIA Bases científicas para una agricultura sustentable. Editorial Nordan–Comunidad. ISBN (Nordan): 9974-42-052-0

Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2007). Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación. Ecosistemas, 16(1), 3-12.

Barrantes, C., Siura, S., Castillo, E., Huarcaya, M., Rado, J. & Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) (2016). *Guía para el análisis de la Sostenibilidad*

de Sistemas de Producción de la Agricultura Familiar (SPAF). Obtenido de: https://hdl.handle.net/11324/7026.

Benítez, M., Rivera-Núñez, T., & García-Barrios, L. (Compiladores). (2022). *Agroecología y sistemas complejos: Planteamientos epistémicos, casos de estudio y enfoques metodológicos*. SOCLa-México y CopIt ArXives.

Brown, M. T., & Ulgiati, S. (2004). Energy quality, emergy, and transformity: H.T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems. Ecological Modelling, 178(1-2), 201-213. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.03.002

Burgess, P.J., Graves, A., García de Jalón, S., Palma, J.H.N., Dupraz, C., vanNoordwijk, M. (2019). Modelling agroforestry systems. In: Mosquera-Losada M.R., Prabhu, R. (Eds)Agroforestry for Sustainable Agriculture 209-238. Burleigh Dodds Series in Agricultural Science 55.Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing (PDF) Modelling agroforestry systems. Available from: https://www.researchgate.net/publication/333696631_Modelling_agroforestry_systems#fullTextFileContent [accessed Sep 24 2024].

Casanova-Pérez, L., Martínez-Dávila, J. P., López-Ortiz, S., Landeros-Sánchez, C., López-Romero, G., & Peña-Olvera, B. (2015). Enfoques del pensamiento complejo en el agroecosistema. *Interciencia*, 40(3), 210-216. Caracas: Asociación Interciencia.

Casanova, L., Martínez, J., López, S., & López, G. (2016). De von Bertalanffy a Luhmann: Deconstrucción del concepto "agroecosistema" a través de las generaciones sistémicas. *Revista MAD*, (35), 60-74. Universidad de Chile. https://doi.org/10.5354/0718-0527.2016.42797

Campbell, Daniel & Brown, Mark & Bardi, & Comar, Vito & Huang, & Rydberg, Torbjörn & Tilley, David & Ulgiati, Sergio. (2004). Emergy Synthesis 3, Theory and Applications of the Emergy Methodology Proceedings of the 3rd Biennial Emergy Research Conference, the Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville FL. 572 p.

Calzadilla-Pérez, O. O. (2023). Mapeo cienciométrico de las Neurociencias de la Educación: Miradas para la formación de docentes. Estudios Pedagógicos, 49(1), 281-303. https://doi.org/10.4067/S0718-07052023000100281

Cardona-Román, D. M., & Sánchez-Torres, J. M. (2017). Análisis cienciométrico de la producción científica acerca de la investigación sobre la evaluación de la implementación del e-learning en el periodo 2000-2015. Educación, 26(51), 7-34. https://doi.org/10.18800/educacion.201702.001

Cafés de Colombia. (2024). Descubre el ciclo del café y sus etapas principales. https://cafesdecolombia.co/ciclo-del-cafe/

CENICAFÉ. (2021). Guía técnica para la fertilización en cafetales. Centro Nacional de Investigaciones de Café. https://www.cenicafe.org/

Cenicafé. (s.f.). Agroforestería y sistemas agroforestales con café. Recuperado de https://www.cenicafe.org/es/publications/Agroforester%C3%ADa_y_sistemas_agroforestales_con_caf%C3%A9.pdf

Cenicafé. (s.f.). Crecimiento y desarrollo del cafeto. Cap 2. https://www.cenicafe.org/es/documents/LibroSistemasProduccionCapitulo2.pdf

Cenicafé. (s.f.). Producción y descomposición de biomasa seca y transferencia de nutrientes en sistemas agroforestales con café. Cap 5. https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/4205/1/cap5.pdf

Centro de Energías Renovables - CER. (s.f.). *Proyecto: Herramientas de cálculo para energías renovables*. Santiago de Chile: Ministerio de Energía, Gobierno de Chile.

Centro de Agricultura de Precisión - INIA. (2020). *Capítulo 20: Modelos predictivos para estimación de producción de cultivos* (CAI_20.pdf). En *Curso de Agricultura Inteligente*.

CIFOR. (2022). El potencial de los sistemas agroforestales frente a los monocultivos y para el carbono. https://forestsnews.cifor.org/79204/el-potencial-de-los-sistemas-agroforestales-frente-a-los-monocultivos-y-para-el-carbono?fnl=en

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca [CVC]. (2003). *Bosques Andinos y Subandinos del Departamento del Valle del Cauca*. Santiago de Cali.

Cuatrecasas, J. (1989). Aspectos de la vegetación natural de Colombia. Pérez Arbelaezia, 11, 155-287.

Del Pozo Rodríguez, Pedro P., Vallim de Melo, Cauê, & Ortega Rodríguez, Enrique. (2014). El análisis emergético como herramienta para evaluar la sustentabilidad en dos sistemas productivos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, *23*(4), 59-63. Retrieved October 23, 2024, from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542014000400010&lng=en&tlng=es.

EAAB Bogotá. (2025). Tarifas 2025 - Bogotá. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Recuperado de https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/atencion-al-usuario/tarifas/tarifas_2025

FAO. (2019). *Guía para la gestión eficiente del agua en sistemas agrícolas*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado de http://www.fao.org/3/ca6030es/ca6030es.pdf

FAO. (s.f.). *Manual de compostaje del agricultor*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. https://www.fao.org/4/i3388s/i3388s.pdf

Farfán-Valencia, F. (2020). Administración del cultivo del café en sistemas agroforestales – SAF. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Ed.), Manejo Agronómico de los Sistemas de Producción de Café (pp. 72–123). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0002_3

Farfán V., F. (2014). Agroforestería y Sistemas Agroforestales con Café. Manizales, Caldas (Colombia), 342 p. FNC – Cenicafé.

Ferreira, O. I. C., Hurtado, M. P. S., García, E., & Bonilla Correa, C. R. (2010). Emergía de tres sistemas agroforestales en el sur del municipio de Lempira, Honduras. Acta Agronómica, 59(3), 327-337.

Fernández-Ojeda, Paul René, Acevedo, David Cristóbal, Villanueva-Morales, Antonio, & Uribe-Gómez, Miguel. (2016). Estado de los elementos químicos esenciales en suelos de los sistemas natural, agroforestal y monocultivo. Revista mexicana de ciencias forestales, 7(35), 65-77. Recuperado en 22 de mayo de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000300065&lng=es&tlng=es.

*Furcal-Beriguete, Parménides, Robles-Argüello, Zeydi, & Salazar-Díaz, Ricardo. (2023). Evaluación de la fertilidad de los suelos en sistemas agroforestal con Palma Africana (Elaeis guineensis Jacq.). *Revista Tecnología en Marcha*, *36*(2), 20-31. https://dx.doi.org/10.18845/tm.v36i2.5903

Gavilánez-Luna, Freddy Carlos & Gómez-Vargas, María José (2022). Definición de dosis de nitrógeno, fósforo y potasio para una máxima producción del maíz híbrido Advanta 9313 mediante el diseño central compuesto. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, *23*(1).

Gaxiola Carrasco, H. (2016). Crisis mundial de la agricultura convencional. Revista Ciencia y Universidad, 33. Universidad Autónoma de Sinaloa. Recuperado de https://revistas.uas.edu.mx/index.php/CyU/article/view/463

Grigoroudis, E., Kouikoglou, V. S., & Phillis, Y. A. (2024). Agricultural sustainability assessment and national policy-making using an axiomatic mathematical model. *Environmental and Sustainability Indicators*, 22, 100401. https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100401

Giannetti, B.F., Barrella F.A., Almeida, C.M.V.B. (2006). A combined tool for environmental scientists and decision makers: ternary diagrams and emergy accounting, Journal of Cleaner Production, Volume 14, Issue 2, Pages 201-210, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.002

Hengl, T., et al. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, 12(2), e0169748. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748

Ibáñez, J. (2022). Tasas de fijación de carbono en biomasa total y valoración económica de sistemas de producción de cacao [Tesis]. Universidad Nacional Agraria La Molina.

https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14292/2393/TS_IBAG_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Illescas-Alonso, Lorena, Cruz-León, Artemio y Uribe-Gómez, Miguel (2020). Sistemas agroforestales tradicionales desde la perspectiva del "Buen Vivir". Revista de Geografía Agrícola, (65), 29-43.

Instituto Forestal (INFOR) (2008). Modelos agroforestales. Sistema productivo integrado para una agricultura sustentable. Concepción, Chile: https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/17198

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andréis e Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2017). *Memoria técnica del Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia, escala 1:100.000*. Bogotá D.C., Colombia.

Izursa Azurduy, José Luis. (2011). Emergía (con M), una herramienta nueva para estimar el valor de la madera en el bosque. *Ecología en Bolivia*, *46*(2), 71-76. Recuperado en 23 de octubre de 2024, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282011000200001&lng=es&tlng=es.

Jaramillo, S. (2021). Manejo agronómico de cultivos intercalados con café. En Centro Nacional de Investigaciones de Café, *Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3a ed., pp. 81-94). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/10791/0014_5&#8203

Jianling Fan, Brian G. McConkey, H. Henry Janzen, Perry R. Miller, Emergy and energy analysis as an integrative indicator of sustainability: A case study in semi-arid Canadian farmlands, Journal of Cleaner Production, Volume 172, 2018, Pages 428-437, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.200

Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., ... & Ritchie, J. T. (2003). *The DSSAT cropping system model*. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 235–265.

Le Corre, O. Truffet, L. Lahlou, C. (2015) Odum–Tennenbaum–Brown calculus vs emergy and co-emergy analysis, Ecological Modelling, Volume 302, Pages 9-12, ISSN 0304-3800, https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.01.021.

López-Gómez, A., Haro-Sarango, A., & Gómez-Romo, M. del C. (2024). Gestión del conocimiento: Un estudio cienciométrico. Revista SIGMA, 11(1), 157-172. https://doi.org/10.24133/gd711565

López, C., Marín, J., & Andrade, A. (2016). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias

Exactas, Físicas y Naturales, 40(154), 231-245. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262016000200012

Luedeling, E., Smethurst, P. J., Baudron, F., Bayala, J., Huth, N. I., van Noordwijk, M., Ong, C. K., Mulia, R., Lusiana, B., Muthuri, C., & Sinclair, F. L. (2016). Field-scale modeling of tree–crop interactions: Challenges and development needs. Agricultural Systems, 142, 51-69. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.11.005

Marín, J., Andrade, A., & Sandoval, M. (2016). Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con maderables y frutales en Tolima, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 40(154), 231-245.

Martinez-Bautista, I. (2017). SOIL FERTILITY, EMERGY EVALUATION, AND IMPROVEMENTS TO MILPA IN INDIGENOUS ZAPOTEC AGROFORESTRY SYSTEMS. Tomado de https://experts.esf.edu/esploro/outputs/99872902904826

Martínez Romero, Eduardo, & Esparza Olguín, Ligia Guadalupe. (2021). Teorías de Sistemas Complejos: marco epistémico para abordar la complejidad socioambiental. *Intersticios sociales*, (21), 373-398. Epub 30 de agosto de 2021. Recuperado en 31 de octubre de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-49642021000100373&lng=es&tlng=es.

Michán, L. & Muñoz-Velasco, I. (2013). Scientometrics for the medical sciences: Definitions, applications and perspectives. Revista de Investigación En Educación Médica, 2(6), 100-106. Recuperado de http://riem.facmed. unam.mx/node/73. https://doi.org/10.1016/S2007-5057(13)72694-2

Marín, J., Andrade, A., & Sandoval, M. (2016). Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con maderables y frutales en Tolima, Colombia.

Moreno Calles, A. I., Soto-Pinto, L., Cariño-Olvera, M. M., Palma García, J. M., Moctezuma Pérez, S., Rosales Adame, J. J., Montañez Escalante, P. I., Sosa Fernández, V. J., Ruenes Morales, M. R., & López Martínez, W. (2020). Los sistemas agroforestales de México: Avances, experiencias, acciones y temas emergentes. Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia. https://doi.org/10.22201/enesmorelia.9786073040761e.2020

Morales López, B. M. (2021). *Análisis de sistemas agroforestales y su alternativa sostenible en la producción agrícola*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/20968/bmmoraleslo.pdf

Montagnini, F., Prause, J., & Gallardo, M. (2014). El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 18(1), 23-31. Universidad de Colima. https://www.redalyc.org/journal/837/83729789003/html/

Muñoz Valerio, W., Gómez Alfaro, E., Paniagua Molina, J., Solórzano Thompson, J., & Barboza Navarro, D. (2024). Evaluación de la sostenibilidad de sistemas productivos mediante análisis emergético: Conceptos básicos. Estudios Económicos, 41(83), 240-260. https://doi.org/10.52292/j.estudecon.2024.4628

Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). *Total carbon, organic carbon, and organic matter*. In D. L. Sparks (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 3—Chemical Methods (pp. 961–1010). Soil Science Society of America.

Odum, H. T. (1996). Environmental accounting: Emergy and environmental decision making. New York: John Wiley & Sons.

Oficina Nacional Forestal (ONF). (2013). Guía Técnica SAF para la implementación de Sistemas Agroforestales (SAF) con árboles forestales maderables. Boletín Costa Rica Forestal # 09, Guías Prácticas.

Oliveira, L. C., et al. (2015). *Modelo de aplicación para estimar el consumo de diésel en cultivos agrícolas*. Revista Colombiana de Ciencia Animal, 7(2), 223-237. https://www.redalyc.org/pdf/2231/223150958001.pdf

Oviedo-Celis Ricardo Andrés et al. (2022). *Un análisis comparativo de la sostenibilidad de sistemas para la producción de café en Colombia*. Cienc. Tecnol. Agropecuaria, 22(3), e2230. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num3_art:2230

Pereira Morales, C. A., Maycotte Morales, C. C., Restrepo, B. E., Mauro, F., Calle Montes, A., Velarde, M. J. E., Marín Serna, G. L., Álvarez Mejía, M. L., Portela Guarín, H. (2011). Sistemas Agroforestales. Primera Edición. Universidad Guglielmo Marconi - Italia, Universidad de Valladolid - España, Universidad Mayor San Andrés - Bolivia, Universidad de Caldas - Colombia, Departamento de Estudios Educativos, Universidad de Caldas, Unión Europea.

Pérez Preciado, A. (2002). *Bases para la regionalización de Cundinamarca*. Pérez, Departamento Administrativo de Planeación, Unión Europea.

Porter, E. M., Bowman, W. D., Clark, C. M., Compton, J. E., Pardo, L. H. y Soong, J. L. (2013). Interactive effects of anthropogenic nitrogen enrichment and climate change on terrestrial and aquatic biodiversity. Biogeochemistry, 114 (1/3), 93–120. https://doi.org/10.1007/s10533-012-9803-3.

Pribyl, D. W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*, 156(3–4), 75–83. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUMA. (2015). Agricultura y medio ambiente: Retos del cambio climático y opciones normativas. Documento normativo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, CSD-16. www.unep.org

Pulselli, F. M., Coscieme, L., & Bastianoni, S. (2011). Ecosystem services as a counterpart of emergy flows to ecosystems. Ecological Modelling, 222(15), 2924–2928. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.04.022

Ramos Cantillo, J. A., Becerra Vélez, E., Cárdenas Hernández, J. F., & Jiménez Pizarro, R. (2019). Aplicación del modelo AquaCrop para un cultivo de maíz (*Zea mays* L.). *Revista de Sistemas de Producción Agroecológica*, 10(2), 19–32.

Redmas. (2024). Suben las tarifas del Acueducto en Bogotá, Soacha y otros municipios. Recuperado de https://redmas.com.co/colombia/A-banarse-mas-rapido-suben-las-tarifas-del-Acueducto-en-Bogota-Soacha-y-otros-municipios-20240719-0025.html

Rivera, M. A., García, K., & Franco, L. M. (2018). *Diagnóstico, manejo y mitigación de los impactos ambientales y sociales en el remanente de bosque subandino El Espejo en la Universidad de Ibagué*. Universidad de Ibagué.

Rodríguez Salcedo, J., & Sánchez de Praguer, M. (2010). Valoración emergética en sistemas agroecológicos de la zona centro. V Congreso Latinoamericano de Agroecología.

Rosset, P. M. (1997). La crisis de la agricultura convencional, la sustitución de insumos y el enfoque agroecológico. Instituto de Políticas de Alimentación y Desarrollo (Food First), Oakland, CA. Recuperado de https://doctoradoagroecoudea.files.wordpress.com/2013/03/sustinsumos.pdf

Rudas, G., Marcelo, D., Armenteras, D., Rodríguez, N., Morales, M., Delgado, L. C. & Sarmiento, A. (2007). *Biodiversidad y actividad humana: relaciones en ecosistemas de bosque subandino en Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Sandoval, J., Vivas, G., & Jaramillo, D. (2020). Evaluación del modelo AquaCrop para simular la biomasa y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) bajo condiciones climáticas variables. *Agrociencia*, 54(3), 231–244.

Semitiel García, M., & Noguera Méndez, P. (2004). Los sistemas productivos regionales desde la perspectiva del análisis de redes. *Redes. Revista Hispana para el Análisis de Redes Sociales*, 6, 79-105.

Stewart, Stephen B., Anthony P. O'Grady, Daniel S. Mendham, Greg S. Smith, and Philip J. Smethurst. 2022. "Digital Tools for Quantifying the Natural Capital Benefits of Agroforestry: A Review" Land 11, no. 10: 1668. https://doi.org/10.3390/land11101668

Smethurst, P. J., Huth, N. I., Masikati, P., Sileshi, G. W., Akinnifesi, F. K., Wilson, J., & Sinclair, F. (2017). Accurate crop yield predictions from modelling tree-crop interactions in gliricidia-maize agroforestry. Agricultural Systems, 155, 70-77. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.04.008

Suca Apaza, F., Suca Apaza, G., & Siche Jara, R. (2012). Sostenibilidad ambiental del sistema de producción de café orgánico en la región Junín. Apuntes de Ciencia Social, 2(1), 53-64.

Thomas, Esteban Ricardo; Cancio, Hernan. (2013). De la focalización al enfoque territorial : experiencias de extensión rural en los grandes valles de la norpatagonia / coordinado por Carlos Alemany. - 1ª ed.- Alto Valle : Ediciones INTA, 2013. p. 255-259

Tinoco, F., B. Barragan y H. Esquivel. 2014. Efecto del tamaño en la estructura, composición y diversidad de bosques premontanos en la cuenca del Rionegro-Cundinamarca. *Revista Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia* 26: 49-58.

Tittonell, Pablo. (2019). Las transiciones agroecológicas: múltiples escalas, niveles y desafíos. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, *51*(1), 231-246. Recuperado en 31 de octubre de 2024, de https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1853-86652019000100017&lng=es&tlng=es.

Torres-Verzagas, B. E., Leyva-Galán, A., & Del Pozo-Rodríguez, P. P. (2019). Emergía: generalidades, apuntes, y ejemplos de utilidad, como herramienta para evaluar la sostenibilidad. Cultivos Tropicales, 40(2), e10. https://ediciones.inca.edu.cuVera Carrasco, O. (2009). Cómo escribir artículos de revisión. *Revista Médica La Paz, 15*(1), 63-69.

Torres González, C. I. (2020). *Modelo híbrido de sistemas energéticos para la evaluación del uso de energías renovables* [Tesis de maestría, Centro de Investigación y Docencia Económicas, A.C.].

Velásquez, J. O., Maniguaje, N. L. & Duque, A. J. (2012). Diversidad y dinámica de un bosque subandino de altitud en la región norte de los Andes colombianos. *Revista de Biología Tropical, 60*(2), 943-952.

Vera Carrasco, O. (2009). Cómo escribir artículos de revisión. *Revista Médica La Paz, 15*(1), 63-69.

Wang, L., Li, L., Cheng, K., Ji, C., Yue, Q., Bian, R., & Pan, G. (2018). An assessment of emergy, energy, and cost-benefits of grain production over 6years following a biochar amendment in a rice paddy from China. Environmental Science and Pollution Research, 25(10), 9683-9696.

Zhao Sheng, Li Zizhen, Li Wenlong, A modified method of ecological footprint calculation and its application, Ecological Modelling, Volume 185, Issue 1, Pages 65-75, ISSN 0304-3800, https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.11.016