

# LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

Revisión de literatura y análisis de prácticas de logística inversa en el sector agrícola de la producción de café.

Autor:

Mauro Alejandro Aguillon Sánchez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Industrial

Director:

José Luis Garces Bautista

Doctor en Administración y Dirección de Empresas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías físico-mecánicas

Escuela de estudios industriales y empresariales

Bucaramanga

2026

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

**Tabla de contenido**

|   |    |
|---|----|
| Introducción .....  | 9  |
| Tabla Cumplimiento de Objetivos .....   | 11 |
| 1. Planteamiento del Problema .....   | 11 |
| 2. Objetivos .....  | 13 |
| 2.1 Objetivo General .....  | 13 |
| 2.2 Objetivos Específicos.....  | 13 |
| 3. Marco de referencia. ....  | 14 |
| 3.1 Marco de antecedentes .....   | 14 |
| 3.2 Marco Teórico.....  | 16 |
| 3.2.1 Logística inversa .....   | 16 |
| 3.2.2 Economía circular .....   | 16 |
| 3.2.3 Cadena de suministros sostenible .....  | 17 |
| 3.2.4 Análisis bibliométrico .....  | 17 |
| 3.2.5 Revisión de sistemática de la literatura.....   | 18 |
| 3.2.6 Sector cafetero .....   | 18 |
| 4. Metodología .....  | 18 |
| 4.1 Definición de la pregunta de investigación.....   | 19 |
| 4.2 Criterios de inclusión y exclusión de estudios.....   | 19 |
| 4.3 Búsqueda de la documentación.....   | 20 |
| 4.4 Selección de los estudios. ....   | 21 |
| 5. Revisión bibliográfica.....  | 23 |
| 5.1 análisis bibliométrico .....  | 24 |
| 5.1.1 Criterios de inclusión en la bibliometría.....  | 25 |
| 5.1.2 análisis de publicación por país .....  | 25 |
| 5.1.3. Análisis de publicación por año .....  | 27 |
| 5.1.4. Análisis de palabras clave.....  | 28 |
| 5.1.6. Análisis de factor de impacto.....   | 31 |
| 6. Análisis conceptual de la logística inversa .....  | 31 |
| 6.1 La LI como problema de diseño de sistemas: convergencias y diferencias en la literatura ..... | 32 |

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

|   |    |
|---|----|
| 6.2 Marcos conceptuales relacionados.....   | 34 |
| 6.3 Metodologías para la toma de decisiones en sistemas de LI .....   | 37 |
| 6.4 Análisis comparativo de enfoques teóricos: similitudes, diferencias y complementariedades.....                      | 38 |
| 6.5 Definición de logística inversa aplicada al sector cafetero colombiano .....  | 41 |
| 6.6 Vacíos investigativos y limitaciones del corpus conceptual.....   | 42 |
| 7. Rutas de valorización: análisis comparativo por aplicación tecnológica.....  | 42 |
| 7.1 Digestión anaerobia y producción de biogás: la ruta de mayor integración de ciclos....                              | 43 |
| 7.2 Rutas termoquímicas: pirolisis, torrefacción y gasificación .....   | 44 |
| 7.3 Biocombustibles líquidos: potencial de alto valor con alta complejidad técnica .....                                | 46 |
| 7.4 Materiales de construcción y manufactura: una ruta de alta tolerancia logística .....                               | 46 |
| 7.5 Biorrefinería y compuestos bioactivos: la ruta de mayor valor potencial .....                                       | 47 |
| 7.6 Aplicaciones biológicas y de remediación ambiental: las rutas más accesibles para pequeña escala .....              | 49 |
| 7.7 Factores transversales que determinan la viabilidad de los sistemas de logística inversa .....                      | 50 |
| 8. Análisis de la revisión documental para las aplicaciones de logística inversa en el café en el sector agrícola ..... | 52 |
| 8.1 Impacto ambiental del beneficio húmedo: el punto de partida del sistema de retorno...53                             |    |
| 8.2 Retorno agronómico: cierre del ciclo de nutrientes en el sistema cafetero.....                                      | 55 |
| 8.3 Valorización bioenergética rural: potencial y condiciones de viabilidad .....                                       | 57 |
| 8.4 Barreras logísticas y estructurales en el sector cafetero colombiano.....   | 58 |
| 8.5 Potencial de sistemas circulares: el rol de la FNC, las cooperativas y la academia .....                            | 61 |
| 8.6 Vacíos investigativos en el contexto colombiano.....  | 62 |
| 9. Prácticas de logística inversa más efectivas en el sector cafetero colombiano.....                                   | 63 |
| 9.1 Modelo multicriterio: definición.....   | 64 |
| 9.2 Matriz de puntuación multicriterio: evaluación de prácticas de logística inversa .....                              | 65 |
| 10. Difusión de los resultados de la investigación .....  | 71 |
| 11. Conclusiones .....  | 71 |
| 12. Recomendaciones.....  | 74 |
| Referencias bibliográficas.....   | 76 |

**Lista de tablas**

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1</b> Tabla Cumplimiento de Objetivos .....  | 11 |
| <b>Tabla 2</b> Ecuaciones de búsqueda final .....   | 21 |
| <b>Tabla 3</b> Palabras clave.....  | 24 |
| <b>Tabla 4</b> Marcos conceptuales relacionados con la logística inversa y su implicación para el sector cafetero ..... | 36 |
| <b>Tabla 5</b> Análisis de enfoques teóricos sobre logística inversa en la literatura revisada .....                    | 39 |
| <b>Tabla 6</b> Matriz comparativa de rutas de valorización de subproductos cafeteros .....                              | 51 |
| <b>Tabla 7</b> Barreras para la implementación de logística inversa en el sector cafetero colombiano                    | 59 |
| <b>Tabla 8</b> Definición de criterios.....   | 64 |
| <b>Tabla 9</b> Ranking de efectividad territorial de prácticas de logística inversa en la caficultura colombiana.....   | 66 |

**Lista de figuras**

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> Diagrama de flujo PRISMA .....                                      | 22 |
| <b>Figura 2</b> Publicaciones por país de la base de datos Scopus .....             | 25 |
| <b>Figura 3</b> Publicaciones por país de la base de datos WoS. ....                | 26 |
| <b>Figura 4</b> Publicaciones por año de la base de datos Scopus. ....              | 27 |
| <b>Figura 5</b> Publicaciones por año de la base de datos WoS.....                  | 28 |
| <b>Figura 6</b> Referencia de análisis de palabras claves base de datos Scopus..... | 29 |
| <b>Figura 7</b> Referencia de análisis de palabras claves base de datos WoS .....   | 30 |
| <b>Figura 8</b> Matriz multicriterio de efectividad territorial.....                | 66 |

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

### **Lista de Apéndices**

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Apéndice A. Artículo publicable.

Apéndice B. Tabla Excel artículos seleccionados en la revisión

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

### Resumen

**Título** Revisión de literatura y análisis de prácticas de logística inversa en el sector agrícola de la producción de café.\*

**Autor** Mauro Alejandro Aguillon Sánchez\*\*

**Palabras clave** Logística inversa, Cadena de suministro inversa, Gestión de residuos, Café

### Descripción

La cadena de suministro del café genera un gran volumen de residuos orgánicos a lo largo de sus etapas, desde el cultivo hasta el consumo. En Colombia como país con alta relevancia productiva de café, estos residuos, principalmente pulpa, mucílago, tallos y borras han sido tradicionalmente descartados o aprovechados de forma limitada, lo que implica pérdida de valor e impactos ambientales. De esta forma la logística inversa se plantea como un enfoque clave para rediseñar la cadena bajo principios de sostenibilidad y economía circular; sin embargo, el trabajo de grado demuestra que en el sector cafetero de Colombia la implementación de logística inversa aún es incipiente y carece de una visión que articule actores, recursos y procesos de recuperación.

El trabajo de grado desarrolla una revisión sistemática de literatura cuyo objetivo principal es identificar prácticas de logística inversa efectivas para la gestión de residuos y subproductos en el sector agrícola del café. Metodológicamente este adopta los lineamientos PRISMA para garantizar rigor, transparencia y trazabilidad en el proceso de revisión, como resultado el trabajo de grado consolida un conjunto de 63 artículos como base documental principal. Teniendo en cuenta esto, el cuerpo de literatura revisada muestra que subproductos como pulpa, mucílago, cáscara, pergamino y cascarilla plateada, si no se gestionan adecuadamente, pueden asociarse a problemas de contaminación hídrica y del suelo; a la vez, representan oportunidades concretas de recuperación de valor económico y ambiental mediante aplicaciones de logística inversa.

---

\* trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías físico-mecánicas Escuela de estudios industriales y empresariales. Director: José Luis Garces Bautista PhD. En Administración y Dirección de Empresas

**Abstract.**

**Title** Literature Review and Analysis of Reverse Logistics Practices in the Agricultural Coffee Production Sector\*

**Author** Mauro Alejandro Aguillon Sánchez\*\*

**Keywords** Reverse logistics, Reverse supply chain, Waste management, Coffee

**Description**

The coffee supply chain generates a large volume of organic waste throughout its stages, from cultivation to consumption. In Colombia, as a country with high relevance in coffee production, these wastes mainly pulp, mucilage, stems, and *spent coffee grounds* have traditionally been discarded or used only to a limited extent, leading to value loss and environmental impacts. In this context, reverse logistics is presented as a key approach to redesign the supply chain under principles of sustainability and the circular economy; however, the undergraduate thesis shows that in Colombia's coffee sector the implementation of reverse logistics is still incipient and lacks a comprehensive vision that integrates actors, resources, and recovery processes.

The thesis develops a systematic literature review whose main objective is to identify effective reverse logistics practices for managing waste and by-products in the agricultural coffee sector. Methodologically, it adopts the PRISMA guidelines to ensure rigor, transparency, and traceability in the review process. As a result, the thesis consolidates a set of 63 articles as its main documentary basis. In light of this, the reviewed body of literature shows that by-products such as pulp, mucilage, *husk*, *parchment*, and silver skin, if not properly managed, can be associated with water and soil pollution problems; at the same time, they represent concrete opportunities for economic and environmental value recovery through reverse logistics applications.

---

\* Degree Work

\*\* \*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering School of Industrial and Business Studies. Director: José Luis Garces Bautista PhD. in Business Administration and Management

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

### **Introducción**

La producción agrícola representa un pilar esencial para el desarrollo económico y social de América Latina, siendo fuente de empleo, alimento y exportaciones clave para muchos países de la región. En este escenario, el café colombiano destaca como un producto insignia no solo por su calidad reconocida mundialmente, sino también por su impacto económico directo en 2024, Colombia exportó aproximadamente 12,4 millones de sacos, lo que representó ingresos superiores a los 3.600 millones de dólares, consolidando su posición como el tercer mayor exportador mundial (Federación Nacional de Cafeteros, 2024). No obstante, este crecimiento sostenido contrasta con los desafíos ambientales y logísticos que enfrenta el sector, entre los cuales destaca la gestión ineficiente de residuos y subproductos agrícolas.

A medida que la sostenibilidad se convierte en un imperativo transversal para todas las industrias, la agricultura y en particular la caficultura se enfrenta a la necesidad urgente de transitar hacia modelos productivos más eficientes y responsables con el medio ambiente. En este contexto, la logística inversa (LI) ha ganado relevancia como estrategia para la revalorización de residuos, el cierre de ciclos productivos y la disminución de externalidades negativas. Este enfoque, tradicionalmente más presente en entornos industriales y urbanos, está comenzando a ser explorado en contextos rurales, con potenciales beneficios tanto ambientales como económicos.

La logística inversa en el sector agrícola implica el diseño de procesos para recolectar, clasificar y reutilizar residuos y subproductos agrícolas (ISAM Academy, 2024), tales como pulpas, cáscaras y aguas mieles en el caso del café. Diversos estudios han demostrado que la aplicación de estas prácticas no solo reduce el impacto ambiental, sino que también puede generar ingresos adicionales, mejorar la eficiencia operativa y fomentar la innovación en las cadenas de suministro. Sin embargo, en Colombia, la implementación de este tipo de estrategias en el sector

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

cafetero aún es limitada, en parte debido a la falta de conocimiento técnico, marcos de referencia adaptados y políticas de incentivo (Gutiérrez, 2021).

La necesidad de superar estos obstáculos justifica el presente trabajo de grado, cuyo propósito es analizar las prácticas aplicables de logística inversa en el sector agrícola del café a partir de una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica. A través de esta metodología se busca identificar experiencias exitosas, clasificarlas según su impacto y viabilidad, y extraer de ellas elementos transferibles al contexto colombiano. Esta aproximación permite construir un marco conceptual robusto que oriente la toma de decisiones en torno a la gestión sostenible de residuos en la caficultura.

Además, esta investigación responde a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente al ODS 12 Producción y consumo responsables, y al ODS 13 Acción por el clima (ONU, 2015). Al optimizar la gestión de residuos en la producción de café, no solo se protege el medio ambiente, sino que se impulsa la innovación rural, se fortalecen las capacidades locales y se mejora la competitividad del sector en el mercado internacional, cada vez más exigente con criterios de sostenibilidad.

Este trabajo, se propone como una herramienta de orientación tanto para académicos como para actores del sector caficultor, contribuyendo al cierre de brechas técnicas y al diseño de estrategias que permitan avanzar hacia una agricultura más circular, resiliente e inclusiva.

**Tabla Cumplimiento de Objetivos**

A continuación, se presenta la tabla de cumplimiento de objetivos.

**Tabla 1***Tabla Cumplimiento de Objetivos*

| <b>Objetivo</b>  | <b>Cumplimiento</b> |
|--|---------------------|
| Diseñar un protocolo de revisión de la literatura que establezca los lineamientos para la búsqueda, selección y análisis de documentos relevantes sobre las prácticas de logística inversa en el sector cafetero.  | Capítulo 4          |
| Efectuar el protocolo de revisión de la literatura con base en un proceso de selección y análisis de información enfocado a la implementación de prácticas de logística inversa en el sector cafetero  | Capítulo 5          |
| Analizar los modelos de aplicación de logística inversa en el sector cafetero con el fin de consolidarlos como estrategia efectiva para la gestión de residuos y subproductos, mejorar la sostenibilidad ambiental y optimizar los procesos de producción. | Capítulo 6,7, 8 y 9 |
| Elaborar un artículo de carácter publicable donde se presenten los resultados de la investigación.   | Capítulo 10         |

**1. Planteamiento del Problema**

La industria cafetera en países productores como Colombia enfrenta importantes retos relacionados con la gestión de residuos generados durante el cultivo, procesamiento y comercialización del café. A pesar de los esfuerzos por mejorar la sostenibilidad del sector cafetero, gran parte de los subproductos derivados del beneficio del grano como la pulpa, el mucílago, el agua residual y los empaques de agroquímicos son inadecuadamente dispuestos, lo que conlleva impactos negativos en el ambiente y la salud de las comunidades rurales (Fernanda, 2016)

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

En este contexto, la logística inversa surge como una alternativa estratégica para mejorar la eficiencia del sistema productivo, reducir externalidades negativas y recuperar valor a través del aprovechamiento de subproductos, el reciclaje de materiales y la correcta disposición de residuos peligrosos. Sin embargo, su implementación en zonas rurales y en sectores agrícolas como el café aún es limitada, debido a barreras logísticas, falta de infraestructura, desconocimiento técnico y ausencia de políticas integrales

Aunque algunos programas, como CampoLimpio en Colombia, promueven la recolección de envases de agroquímicos, estos esfuerzos no han sido articulados de manera sistemática con la cadena de valor del café. Además, la mayoría de los estudios sobre logística inversa se centran en contextos industriales y urbanos, dejando un vacío investigativo sobre su aplicación en sistemas agrícolas de pequeña escala como los de la caficultura (Aguilar-Barojas et al., 2018).

Según Zapata, Pereira y Espitia (2022), en Colombia no existe evidencia en el ámbito investigativo de que exista una amplia implementación de procesos relacionados con logística inversa por parte de las organizaciones regionales; Esto conlleva a que las prácticas de logística inversa en la caficultura colombiana aún se encuentren en etapas tempranas, sin una visión integral que articule actores, recursos logísticos y procesos de recuperación dentro de una red sostenible. Esta ausencia de enfoque sistémico limita la capacidad del sector para responder a los desafíos ambientales y para aprovechar las oportunidades de innovación en la gestión de residuos.

En consecuencia, se identifica la necesidad de estudiar cómo podría implementarse la logística inversa en el contexto de los cultivos de café, considerando sus características productivas, sociales y territoriales. Esto permitiría aportar herramientas y estrategias aplicables a una caficultura más sostenible, resiliente y competitiva, especialmente en regiones rurales donde las soluciones logísticas enfrentan mayores restricciones.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Identificar las prácticas de la logística inversa más efectivas para la gestión de residuos en el sector agrícola de la producción de café mediante una revisión de la literatura.

### **2.2 Objetivos Específicos**

1. Diseñar un protocolo de revisión de la literatura que establezca los lineamientos para la búsqueda, selección y análisis de documentos relevantes sobre las prácticas de logística inversa en el sector cafetero.
2. Efectuar el protocolo de revisión de la literatura con base en un proceso de selección y análisis de información enfocado a la implementación de prácticas de logística inversa en el sector cafetero.
3. Analizar las prácticas de logística inversa en el sector cafetero con el fin de consolidarlos como estrategia efectiva para la gestión de residuos, mejorar la sostenibilidad ambiental y optimizar los procesos de producción.
4. Elaborar un artículo de carácter publicable donde se presenten los resultados de la investigación.

### **3. Marco de referencia.**

En Colombia En el proceso de cultivo e industrialización del café solamente se aprovecha el 5 % del peso del fruto fresco en la preparación de la bebida, mientras que el 95 % restante corresponde a residuos (Fernández Cortés et al., 2020). Según informes de la federación nacional de cafeteros se produjeron alrededor de 15 millones de sacos de café en 2024, los residuos producidos principalmente pulpa, mucílago, tallos y borras han sido tradicionalmente descartados o utilizados de forma limitada, lo que representa una pérdida de valor y un impacto ambiental significativo. En este contexto, la logística inversa emerge como una herramienta clave para rediseñar las cadenas de valor del café bajo los principios de sostenibilidad y economía circular

#### **3.1 Marco de antecedentes**

En los últimos años, la literatura académica ha reconocido que la producción de café desde su cultivo hasta su consumo genera importantes volúmenes de residuos sólidos y líquidos que de no ser gestionados adecuadamente ocasionan impactos negativos en el medio ambiente. El trabajo de Muchangos et al. (2025) constituye un referente clave en esta materia, al realizar una revisión sistemática sobre la aplicación de metodologías de evaluación de impacto ambiental, especialmente el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) y la Huella Ambiental (EF), en la cadena de valor global del café. Este estudio recopiló y analizó 87 artículos que cuantifican impactos desde la etapa de producción agrícola hasta el consumo, revelando que los mayores efectos ambientales se concentran en el uso intensivo de fertilizantes y agua en el cultivo, la generación de aguas residuales en el beneficio húmedo, y las emisiones de gases de efecto invernadero en procesos como la tostación y el transporte. Una de las conclusiones más relevantes de esta revisión es la falta de estandarización en las metodologías empleadas, lo que

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

dificulta la comparación de resultados y la formulación de políticas unificadas. Asimismo, el estudio subraya el potencial de incorporar estrategias de valorización de subproductos, aspecto directamente relacionado con la logística inversa, como herramienta para reducir residuos y recuperar valor en diferentes etapas del ciclo productivo.

En paralelo, la prevención y gestión de pérdidas y desperdicio alimentario bajo principios de economía circular ha sido abordada por Do et al. (2021), quienes analizaron 297 artículos científicos para construir un marco de referencia que conecta el concepto de Economía Circular (EC) con la gestión de pérdidas y desperdicios de alimentos (FLW, por sus siglas en inglés). Aunque el estudio abarca múltiples cadenas agroalimentarias, sus planteamientos resultan especialmente pertinentes para el sector café.

Por su parte, Ranjbari et al. (2022) llevaron a cabo un análisis bibliométrico de 646 artículos sobre el aprovechamiento de biomasa y residuos orgánicos en el marco de la bioeconomía circular (CBE). Entre las tendencias emergentes identificadas, destacan aquellas de interés directo para la cadena del café, como la valorización de borras para la obtención de biocombustibles, bioplásticos y compuestos bioactivos; la producción de *biochar* a partir de residuos agrícolas como mejorador de suelos y sumidero de carbono; y el desarrollo de biorrefinerías capaces de transformar residuos en múltiples productos de alto valor comercial. Este trabajo también pone de relieve que, si bien existen tecnologías viables a escala de laboratorio, su implementación a escala industrial enfrenta desafíos significativos, incluyendo la necesidad de inversión en infraestructura, la superación de barreras tecnológicas y la creación de marcos regulatorios que favorezcan la adopción de soluciones basadas en economía circular.

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

### 3.2 Marco Teórico

El presente marco teórico articula los conceptos centrales que sustentan esta investigación, los cuales convergen en torno a la gestión sostenible de recursos en el sector cafetero colombiano, abordado así el tema central del trabajo de grado.

#### 3.2.1 *Logística inversa*

La logística inversa (LI) constituye uno de los pilares operativos de la sostenibilidad en las cadenas de suministro modernas. Anandhabalaji (2024) la define como el conjunto de procesos que abarcan el retorno, el reciclaje y la reutilización con un nuevo propósito de los productos, destacando su papel clave en la reducción de residuos, la conservación de recursos y la disminución de las huellas de carbono. En el contexto del sector cafetero, este concepto adquiere especial relevancia dado el volumen de subproductos y residuos generados durante las etapas de cultivo, beneficio y transformación del café, tales como la pulpa, el mucílago y las aguas mieles. La correcta gestión de estos materiales a través de la LI no solo mitiga el impacto ambiental, sino que puede generar valor económico adicional mediante su reincorporación al proceso productivo o su aprovechamiento en otras industrias.

#### 3.2.2 *Economía circular*

Estrechamente vinculada a la logística inversa, la economía circular (EC) representa un marco conceptual más amplio que orienta el diseño de sistemas productivos hacia la regeneración y el cierre de ciclos de materiales. Morsetto (2020) la define como un modelo económico dirigido al uso eficiente de los recursos a través de la minimización de residuos, la retención de valor a largo plazo, la reducción de recursos primarios y ciclos cerrados de productos, partes de productos y materiales, todo ello dentro de los límites de la normativa medioambiental, la protección del entorno y los beneficios socioeconómicos. Este modelo propone estructuras productivas en las que los materiales permanezcan en circulación el mayor

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

tiempo posible. Para el sector cafetero, la adopción de principios de economía circular implica repensar integralmente la cadena de valor, desde el aprovechamiento de los residuos del beneficio húmedo hasta la reutilización de empaques y la generación de bioenergía a partir de biomasa cafetera. De esta manera, la EC actúa como marco normativo y estratégico que orienta y da sentido a las prácticas de logística inversa implementadas en el sector.

### ***3.2.3 Cadena de suministros sostenible***

El concepto de cadena de suministros sostenible (CSS) representa la dimensión sistémica e integradora dentro de la cual operan tanto la logística inversa como la economía circular. Según Khan et al. (2021), la CSS integra los objetivos ambientales, económicos y sociales en todo el proceso de fabricación, tanto a nivel operativo como estratégico, para promover la sostenibilidad en el conjunto de la cadena de suministro. En el ámbito cafetero colombiano, donde la cadena de suministro involucra a pequeños productores, cooperativas, comercializadores, exportadores y consumidores finales en distintas latitudes, la gestión sostenible de esta cadena resulta especialmente compleja y prioritaria.

### ***3.2.4 Análisis bibliométrico***

Desde el punto de vista metodológico, este trabajo de grado se apoya en el análisis bibliométrico como herramienta cuantitativa para mapear el estado del conocimiento científico sobre los conceptos de interés para el mismo. Ninkov et al. (2021) definen el análisis bibliométrico como el estudio de la información publicada en formato de artículos científicos, revistas y libros, junto con los metadatos relacionados como palabras clave, citas y resúmenes, mediante la aplicación de técnicas estadísticas para describir o determinar asociaciones entre dichos elementos.

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

### **3.2.5 Revisión de sistemática de la literatura**

La revisión sistemática de la literatura aporta el rigor cualitativo y crítico necesario para interpretar y sintetizar el conocimiento existente. Rodríguez et al. (2024) la caracterizan como un método científico que realiza una síntesis descriptiva y una evaluación crítica y exhaustiva de investigaciones realizadas con anterioridad, en base a una pregunta de investigación claramente definida. Su particularidad radica en la aplicación del método bibliográfico y en su surgimiento como respuesta a las limitaciones de las revisiones narrativas, que dependen en mayor medida del criterio subjetivo del experto.

### **3.2.6 Sector cafetero**

Según la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC, 2021), el sector cafetero colombiano está compuesto principalmente por pequeños productores que cultivan café en diversas regiones del país, bajo condiciones geográficas y climáticas favorables, lo que permite mantener una alta calidad reconocida a nivel mundial. Este sector representa una importante fuente de ingresos y empleo para las zonas rurales, y es un actor clave en la economía nacional y en la proyección internacional del país.

## **4. Metodología**

De acuerdo con la revisión sistemática de la literatura requerida para el presente proyecto de investigación, orientado al análisis de las aplicaciones de la logística inversa en el sector cafetero de Colombia se opta por diseñar un protocolo de revisión siguiendo los lineamientos de la declaración *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA).

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

### 4.1 Definición de la pregunta de investigación.

En los últimos años, la logística inversa ha adquirido una relevancia creciente como estrategia para optimizar el uso de recursos, reducir impactos ambientales y generar valor a lo largo del ciclo de vida de los productos. Sin embargo, en sectores estratégicos como la industria cafetera colombiana, persisten desafíos relacionados con la integración de estos procesos en las cadenas de suministro, la adopción de enfoques sostenibles y la medición de su impacto económico y ambiental. Ante este panorama, surge la pregunta de investigación *¿Cuáles son las principales aplicaciones de la logística inversa en la industria cafetera que se usan como estrategia efectiva para la mejora de cadenas de suministro sostenibles en el contexto colombiano?* Esta pregunta orienta la revisión de la literatura que se presenta, fundamentada en el protocolo PRISMA para garantizar el rigor y la transparencia del proceso investigativo.

### 4.2 Criterios de inclusión y exclusión de estudios.

Para garantizar la pertinencia y la calidad de las fuentes consultadas en el marco de esta revisión sistemática, se establecieron criterios de inclusión que permiten seleccionar únicamente literatura alineada con los objetivos del estudio.

1. Publicaciones entre los años 2015 y primer semestre del 2025.
2. Documentos escritos en inglés
3. Estudios publicados en formato de artículos de investigación o capítulos de libro.
4. Publicaciones con acceso abierto al texto completo, disponibles en las bases de datos seleccionadas.
5. Estudios clasificados en áreas temáticas como *circular economy*, *reverse supply*, *waste recovery* o *sustainability*

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

De manera complementaria, se definieron criterios de exclusión para descartar fuentes que no aportaran al cumplimiento de los objetivos de la investigación. Se eliminaron artículos duplicados, documentos con información incompleta o sin soporte metodológico, así como textos de carácter divulgativo, comerciales o no académicos. También se excluyeron estudios que, aunque mencionan la logística inversa, no desarrollan el concepto ni sus aplicaciones de manera sustancial, y aquellos cuyo enfoque temático se desvía del contexto geográfico, sectorial o temporal definido para esta investigación.

### **4.3 Búsqueda de la documentación**

La búsqueda documental se desarrolló como una fase crítica del protocolo metodológico, orientada a recuperar la mayor cantidad de evidencia relevante y de calidad disponible sobre la logística inversa y sus aplicaciones en el contexto de la producción de café en Colombia. Para ello, se realizaron búsquedas en bases de datos especializadas, específicamente *Scopus* y *Web of Science* (WoS), seleccionadas debido a su amplio respaldo académico y a la cantidad de publicaciones con afinidad temática a la investigación. La estrategia de búsqueda incluyó el uso de palabras clave previamente definidas, combinaciones booleanas y filtros específicos aplicados directamente en las plataformas digitales, con el objetivo de asegurar la pertinencia y actualidad de los resultados. Como resultado, se identificaron 53 documentos en Scopus y 24 en WoS relacionados con la temática definida. La búsqueda final se realizó con las siguientes ecuaciones de búsqueda plasmadas en la tabla 2.

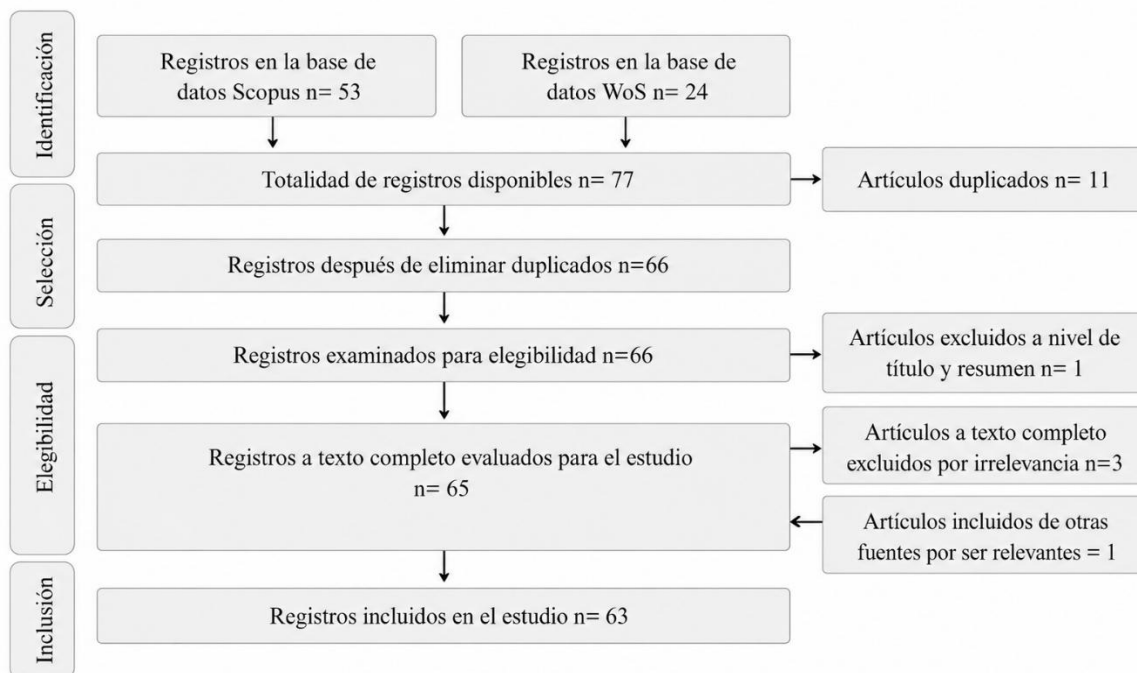
**Tabla 2***Ecuaciones de búsqueda final*

| Base de datos | Ecuación de búsqueda  |
|---------------|---|
| Scopus        | TITLE-ABS-KEY ( ( "reverse logistics" OR "reverse supply chain" OR "waste management" OR "waste recovery" ) AND ( "coffee waste" OR "coffee by-products" OR " <i>spent coffee grounds</i> " ) AND ( agriculture OR "circular economy" OR "sustainability" ) ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ch" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE , "English" ) )      |
| WoS           | TS=( ("reverse logistics" OR "reverse supply chain" OR "waste management" OR "waste recovery") AND ("coffee waste" OR "coffee by-products" OR " <i>spent coffee grounds</i> ") AND (agriculture OR "circular economy" OR sustainability) ) and 2025 or 2024 or 2023 or 2022 or 2021 or 2020 or 2019 or 2018 or 2017 (Publication Years) and English (Languages) and Open Access |

#### 4.4 Selección de los estudios.

La selección de los estudios se llevó a cabo siguiendo los lineamientos del protocolo PRISMA, garantizando la transparencia y trazabilidad del proceso. En una primera etapa, se eliminaron los documentos duplicados y aquellos que no cumplían con los criterios básicos de inclusión (año de publicación, idioma, acceso abierto). En la fase final, se procedió a la lectura a texto completo de los estudios preseleccionados, aplicando los criterios de inclusión y exclusión previamente definidos, con el fin de asegurar que únicamente se integraran fuentes con un alto grado de pertinencia y calidad académica. Como resultado de este proceso, se obtuvo un conjunto de 63 artículos que constituyen el cuerpo principal de la revisión sistemática.

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

**Figura 1***Diagrama de flujo PRISMA*

El artículo incluido fue tomado del repositorio de trabajos de grado de la universidad industrial de Santander y es de alta relevancia para la revisión de la literatura debido a su coherencia en esta ya que en esta investigación se habla sobre las aplicaciones biológicas del mucílago residual producto del beneficio de café una aplicación de logística inversa muy interesante para la discusión en este trabajo de grado.

Finalmente, como resultado se incluyeron en la investigación 63 publicaciones las cuales estarán disponibles en el Apéndice B estas fueron consideradas pertinentes y de alta calidad de esta manera conforman la base documental del trabajo. Entre las publicaciones más destacadas de la selección en la plataforma Scopus podemos encontrar el estudio *“Validation of coffee by-products as novel food ingredients”* este analiza la valorización de los subproductos del café y cuenta con 161 citas lo que lo convierte en un artículo relevante para la investigación dada a

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

la naturaleza de su contenido, este estudio demuestra en el sector cafetero de Colombia la implementación de logística inversa aún es incipiente que algunos subproductos del café poseen alto contenido de fibra dietaria, compuestos antioxidantes y fitoquímicos de interés, lo cual los convierte en materias primas con potencial para la formulación de alimentos funcionales y nutracéuticos. A demás en Web of Science (WoS) también hay estudios igual de relevantes como “Utilization of coffee by-products and value addition A review” el cual cuenta con 141 citas, este habla sobre una revisión integral sobre las posibilidades de valorización de los residuos generados en la producción y procesamiento del café, destacando la necesidad de una gestión eficiente que permita reducir impactos ambientales y, al mismo tiempo, generar valor económico. Entre los principales subproductos abordados se encuentran la pulpa, mucílago, cáscara, pergamino y cascarilla plateada, los cuales representan un alto volumen de desechos orgánicos que, de no ser tratados adecuadamente, ocasionan problemas de contaminación hídrica y del suelo, sin embargo estas no son los únicos artículos destacados, existe gran variedad de estos que muestran una relevancia significativa en el tema de estudio esto demuestra que en las bases de datos existen estudios de alta calidad pertinentes con la investigación en curso.

### **5. Revisión bibliográfica**

Para iniciar la investigación, se realizó una revisión inicial de la literatura con el objetivo de definir los conceptos clave sobre la logística inversa en el cultivo del café. Esta revisión permitió aclarar como los cafeteros están implementando la logística inversa en sus cultivos.

Usando bases de datos como Scopus y Web of Science (WoS), se identificaron artículos y estudios relevantes que ayudaron a establecer palabras clave que aparecen en la tabla 3, las cuales servirán como guía en la investigación.

**Tabla 3***Palabras clave*

| <b>Palabras clave</b>                        | <b>Palabras clave en inglés</b> |
|--|---------------------------------|
| <b>Logística inversa</b>                     | <i>Reverse logistics</i>        |
| <b>Cadena de suministro inversa</b>          | <i>Reverse supply chain</i>     |
| <b>Cadena de suministro de ciclo cerrado</b> | <i>Closed-loop supply chain</i> |
| <b>Recuperación de residuos</b>              | <i>Waste recovery</i>           |
| <b>Gestión de residuos</b>                   | <i>Waste management</i>         |
| <b>Subproductos del café</b>                 | <i>Coffee by-products</i>       |
| <b>Agricultura</b>                           | <i>Agriculture</i>              |
| <b>Economía circular</b>                     | <i>Circular economy</i>         |
| <b>Sostenibilidad</b>                        | <i>Sustainability</i>           |

A partir de las palabras clave identificadas, se delimitaron los conceptos principales y básicos de la investigación.

### **5.1 análisis bibliométrico**

Este estudio bibliométrico tiene como objetivo ofrecer una visión estructurada y detallada de la literatura científica relacionada con la implementación de la logística inversa en la caficultura, a partir de la recuperación y análisis de artículos en bases de datos reconocidas como Scopus y Web of Science. A través de esta aproximación, se busca contribuir a la consolidación del marco teórico de futuras investigaciones, así como orientar estrategias sostenibles en el manejo de residuos agrícolas en el contexto de la cadena productiva del café.

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

### ***5.1.1 Criterios de inclusión en la bibliometría.***

Para la búsqueda e identificación de los documentos se utilizaron las bases de datos Scopus y Web of science. Este proceso se realizó usando los algoritmos de búsqueda que salen en la tabla 2. Vinculado a título del artículo, resumen y palabras claves. Inicialmente, se encontraron 125 resultados y se delimitaron para los siguientes documentos artículos y capítulos de libros, Se excluyeron el resto de las publicaciones y se usaron únicamente los documentos no mayores a 10 años, acceso abierto y que estuvieran en inglés. Es así como la muestra final tuvo 77 documentos. Con estos documentos se organizó en Microsoft Excel una data base que incluyó los siguientes datos nombre de los autores, título de la publicación, año de la publicación, tipo de acceso a la publicación, revista de publicación y país de edición. Esta base de datos permitió identificar a los países, las revistas y las instituciones que están publicando más sobre el tema, así como la relación entre autores del tema y la conexión entre países líderes en investigación del tema.

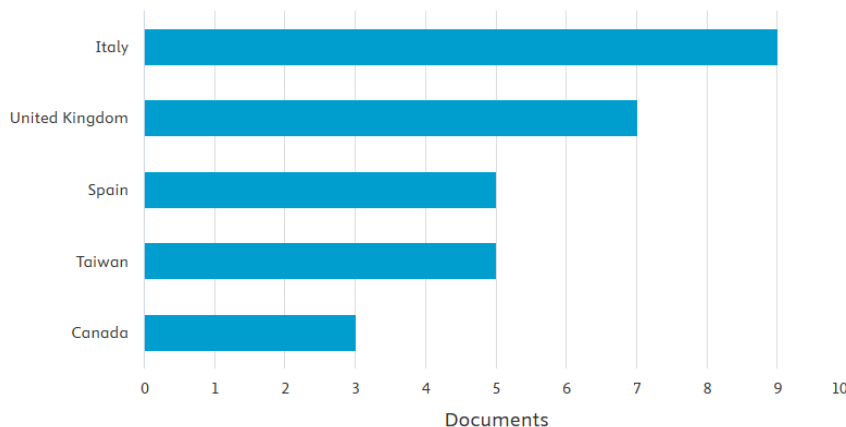
### ***5.1.2 análisis de publicación por país***

Según Scopus los documentos fueron publicados por autores que firmaron con instituciones de filiación provenientes de 37 países entre ellos cabe recalcar que también se encontró Colombia con 2 documentos publicados. Por su parte Italia se clasificó en primer lugar en la cantidad de documentos publicados con 9 publicaciones y el 20% de la producción mundial. A Italia le siguió el reino unido con 7, España con 5, Taiwán con 5 y Canadá con 3 y documentos publicados por país. La lista de los primeros 5 países se puede visualizar en la figura 2

### **Figura 2**

*Publicaciones por país de la base de datos Scopus*

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

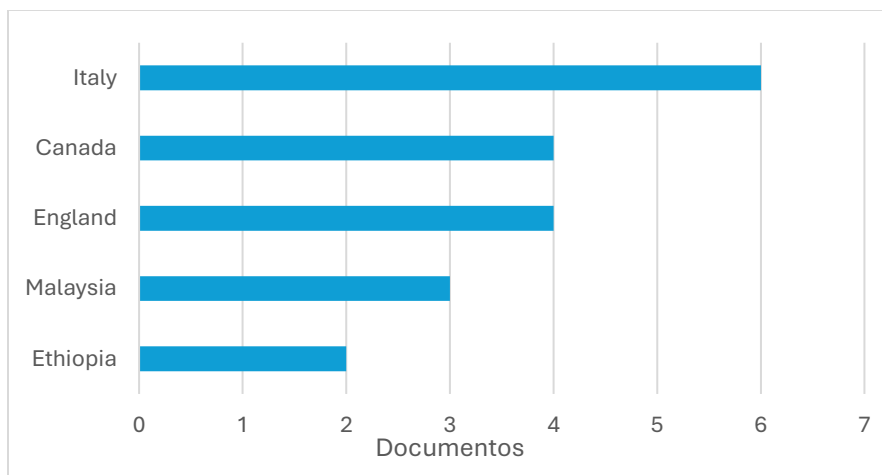


*Nota.* Tomado de la base de datos Scopus, julio 2025.

Por su parte la base de datos WoS en la figura 3 muestra que Italia se encuentra a la vanguardia de la investigación de logística inversa (LI) en la agricultura con un total de 6 publicaciones seguidamente se encuentra Canadá con 4, reino unido con 4, malasia con 3 y etiopia con 2.

**Figura 3**

*Publicaciones por país de la base de datos WoS.*



*Nota.* Gráfico modificado. Tomado de la base de datos WoS, julio 2025.

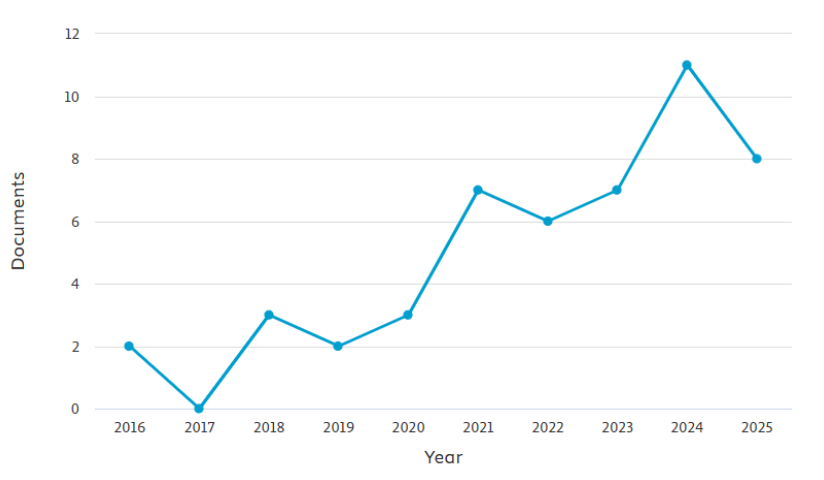
## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

### 5.1.3. Análisis de publicación por año

En los últimos diez años, los datos obtenidos de la herramienta Scopus muestran una evolución lenta en el desarrollo científico de esta área, sin embargo, se nota la tendencia de los investigadores a estudiar más esta área desde los últimos 5 años. En la figura 4 se observa como en los primeros años un interés casi nulo por parte de los investigadores con 0 investigaciones en el 2017 pero que ha ido ascendiendo a lo largo del tiempo con una media de 3 artículos más por año hasta llegar al 2024 donde se publicaron 11 documentos, en lo corrido del año ya van 8 investigaciones realizadas lo que indica que a finalizar el año va a terminar con la tendencia que lleva a lo largo de los años, un área con cada vez mayor interés en el mundo.

#### Figura 4

*Publicaciones por año de la base de datos Scopus.*



*Nota.* Tomado de la base de datos Scopus, julio 2025.

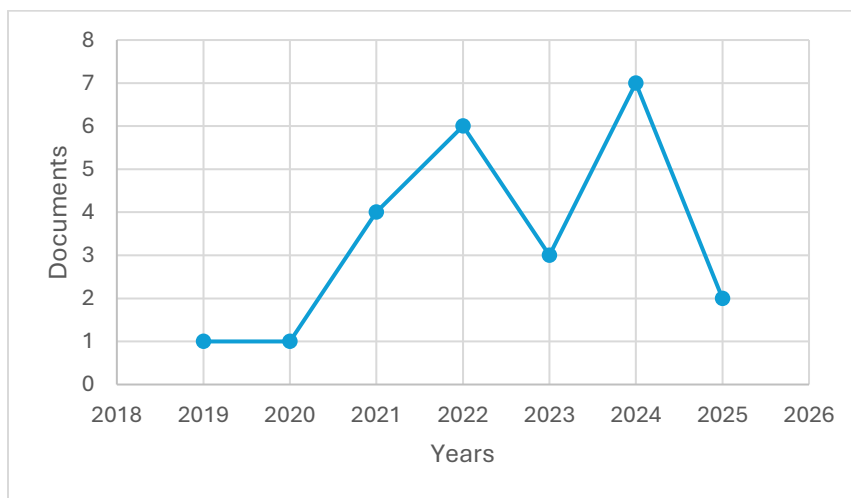
Según los datos analizados en la base de datos WoS desde el 2015 se encontró de igual manera un interés nulo del área para los científicos hasta el 2021 año en el que se realizaron 4 investigaciones y donde se empezó a marcar una tendencia al alza en las investigaciones del tema

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

como se puede observar en la figura 5 para el año 2024 se alcanzó una media de 5 publicaciones por año y en lo que va del 2025 hay 2 publicaciones lo que demuestra que la tendencia sigue igual.

**Figura 5**

*Publicaciones por año de la base de datos WoS.*



*Nota.* Gráfico modificado. Tomado de la base de datos WoS, junio 2025.

### 5.1.4. Análisis de palabras clave.

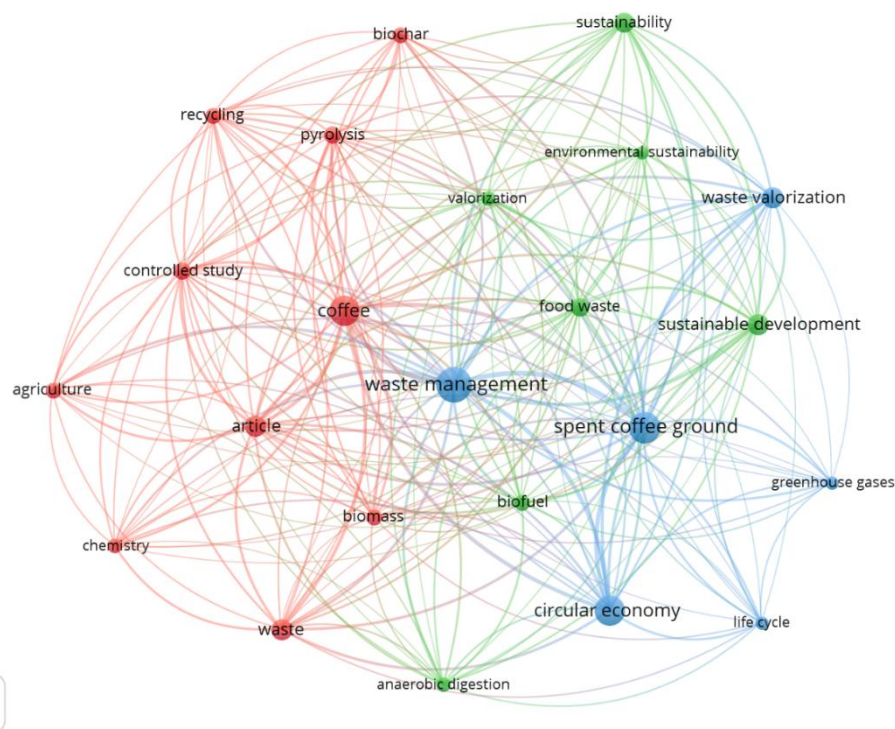
El análisis de los temas centrales en la literatura se realizó en VOSviewer, utilizando la función de coocurrencia de palabras clave a partir de los datos de la base de Scopus, considerando todos los términos indexados. Previamente se aplicó un Tesauro para normalizar y depurar variantes ortográficas o sin ningún sentido para el análisis, con el propósito de evitar errores en la red en este Tesauro de corrigieron errores como *Biofuel* y *Biofuels*, *waste valorizations* y *waste valorization* entre otros errores. Se estableció un umbral mínimo de 5 ocurrencias, lo que permitió identificar 26 términos relevantes de un total de 752. De manera que, entre las palabras clave con mayor frecuencia se destacan “*waste managment*”, “*coffe*” y “*circular economy*” Estos resultados demuestran una conexión entre la gestión de residuos la economía circular y el sector cafetero. Encontramos 3 clústeres del tema, en el primer cluster (rojo) se observa se concentra la literatura

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

que habla sobre los residuos del café como *biomass*, *coffee*, *recycling* entre otras este cluster se conecta principalmente con *waste managment* y con *valorization*, por su parte en el segundos cluster (verde) encontramos la literatura que habla sobre sostenibilidad y valorización con palabras como *sustainability*, *valorization*, *sustainable development* entre otras este cluster se conecta principalmente con *waste managment* como último y más importante encontramos al tercer cluster, en este encontramos la literatura que habla sobre economía circular e indirectamente de logística inversa, en este también encontramos las dos conexiones más fuertes con el resto las cuales son *managment* y *spend coffee grounds* tal como se muestra en la Figura 6.

### Figura 6

*Referencia de análisis de palabras claves base de datos Scopus.*



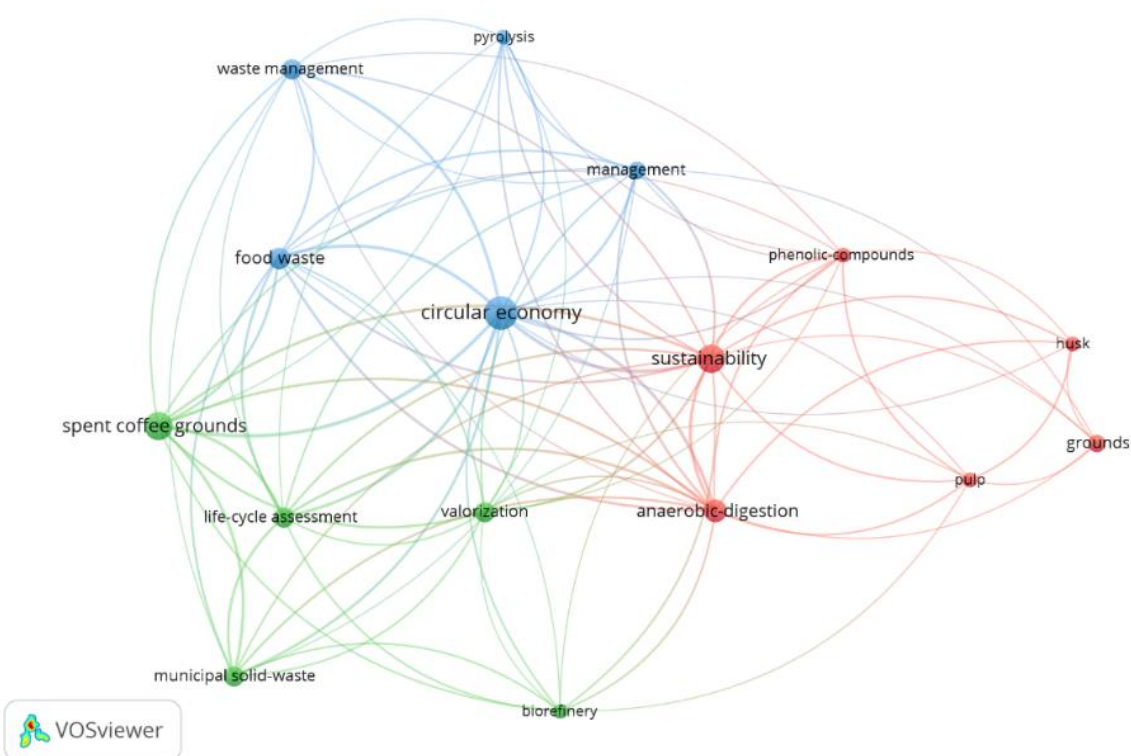
*Nota.* Gráfico modificado en VOSviewer. Tomado de la base de datos Scopus, junio 2025.

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

Para los datos obtenidos de la base WoS, se seleccionaron las palabras clave que aparecieron al menos tres veces en los documentos, lo que resultó en un total de 224 términos registrados. De estos, se identificaron 16 palabras clave que sobresalen por su recurrencia y relevancia dentro del campo. De nuevo encontramos las palabras “*circular conomy*” y “*coffe*”, además, encontramos también “*sustainability*” lo que refleja una consolidación temática, su interconexión se evidencia en la Figura 7.

### Figura 7

*Referencia de análisis de palabras claves base de datos WoS*



*Nota.* Gráfico modificado en VOSviewer. Tomado de la base de datos WoS, julio 2025.

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

### **5.1.6. Análisis de factor de impacto.**

Dentro del análisis bibliométrico, se resalta la importancia de la publicación " *Validation of coffee by-products as novel food ingredients*". Este artículo se destaca entre todos documentos de Scopus, acumulando 161 citaciones, su alta relevancia académica demuestra que este artículo es especialmente relevante para el proyecto investiga validar la cáscara, el pergamino y la piel plateada del café como nuevos ingredientes alimentarios con propiedades beneficiosas para la salud, una aplicación de logística inversa (LI) en el cultivo del café.

De igual forma el análisis nos da a conocer que Saeli, *Manfredi de la Università degli Studi di Palermo* en Palermo Italia es el autor con más artículos publicados en el tema con una cantidad de 3 artículos posicionándolo como el mayor exponente en el tema de estudio y un referente en temas con alrededor de 738 citaciones y 186 solo en el 2025.

El análisis bibliométrico cumplió satisfactoriamente con su propósito al brindar una visión amplia y enriquecedora del tema. De igual forma, la ecuación de búsqueda permitió acceder a información pertinente que fortaleció el sustento teórico de la investigación.

## **6. Análisis conceptual de la logística inversa**

El primer nivel de análisis de la revisión sistemática de literatura aborda la pregunta fundamental del trabajo, que es la logística inversa y como la define la literatura en relación con el sector cafetero. Esta pregunta no es trivial porque la LI no tiene una definición única y estable en la literatura académica. Diferentes autores la enmarcan desde perspectivas distintas, que van desde la gestión operativa de flujos hasta la arquitectura de sistemas de recuperación de valor y la gobernanza de redes de actores. Entender estas diferencias de énfasis no es un ejercicio meramente

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

estructural, es una condición necesaria para interpretar correctamente las prácticas de valorización que se analizan en los capítulos siguientes.

El primer nivel de análisis de esta revisión sistemática aborda una pregunta que, aunque aparentemente introductoria, condiciona toda la interpretación posterior: ¿qué es la logística inversa y cómo la conceptualiza la literatura científica en relación con el sector cafetero? Esta pregunta no tiene una respuesta única. La revisión evidenció que los autores seleccionados abordan la LI desde perspectivas con énfasis distintos, que van desde la gestión operativa de flujos físicos hasta la arquitectura de redes de recuperación de valor y la gobernanza de sistemas de actores múltiples. Comprender estas diferencias es una condición necesaria para interpretar correctamente las prácticas de logística inversa analizadas en los capítulos siguientes y construir un marco analítico con rigor suficiente para orientar decisiones en el contexto cafetero colombiano.

Es importante señalar que los artículos incluidos en la revisión no fueron seleccionados por definir la LI de manera directa, sino por aportar evidencia sobre prácticas de valorización de subproductos cafeteros articuladas con principios de LI y economía circular. Esta distinción metodológica implica que las definiciones que emergen del corpus son diversas en su forma, pero convergentes en sus implicaciones, la recuperación de valor a partir del residuo requiere un sistema de retorno planificado, y ese sistema es el objeto de estudio de la LI.

### **6.1 La LI como problema de diseño de sistemas: convergencias y diferencias en la literatura**

El aporte conceptual más directo a la definición de LI en el corpus revisado proviene de Zohourfazeli et al. (2025), quienes formulan explícitamente el problema como el diseño de una cadena de suministro circular para residuos de café en la que la ineficiencia del sistema de recolección y retorno constituye el principal obstáculo para la valorización. Su propuesta incorpora tecnologías habilitadoras como contenedores inteligentes con sensores IoT para el monitoreo del

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

nivel de llenado y la optimización de rutas de recolección, lo que traduce el concepto abstracto de retorno en decisiones operativas concretas sobre frecuencia de recolección, capacidad de almacenamiento en el punto de generación y sincronización entre la oferta del residuo y la demanda de las instalaciones de transformación. Esta conceptualización posiciona la LI no en el extremo final de la cadena como un problema de disposición, sino en el centro del sistema como un problema de diseño de flujos que determina la viabilidad de todas las rutas de valorización que dependen del residuo.

Mayson y Williams (2021) refuerzan y amplían esta perspectiva al proponer un modelo de valorización de spent coffee grounds (SCG) articulado en torno a un reverse-logistic Product Service Model, definido como un esquema explícito de retorno y servicio orientado a reintegrar el residuo al sistema productivo. Su encuadre resulta especialmente clarificador porque diferencia la LI de la simple gestión de residuos: un sistema de LI no es una flota de camiones que recogen materiales descartados, sino un conjunto articulado de acuerdos, protocolos, incentivos y capacidades que permiten que el residuo llegue al punto de transformación con la calidad, el volumen y la regularidad necesarios para que la valorización sea técnica y económicamente viable. Esta distinción tiene implicaciones directas para el diseño de intervenciones en el sector cafetero colombiano, donde la ausencia de estos acuerdos y protocolos, y no la falta de tecnología de transformación, es la barrera principal.

Scalia et al. (2021) complementan estas visiones al incorporar el concepto de reverse flow options en su análisis de la valorización de SCG en morteros de construcción. Su contribución metodológica radica en mostrar que el diseño de un sistema de LI no consiste en elegir una tecnología de transformación aislada, sino en evaluar un conjunto de alternativas de retorno y seleccionar la más adecuada según criterios ambientales, económicos y logísticos que varían en

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

función del contexto geográfico, la escala de operación y las características del residuo. Esta perspectiva convierte la LI en un problema de ingeniería de sistemas con variables de decisión múltiples, lo que justifica el uso de herramientas analíticas y multicriterio para fundamentar las elecciones estratégicas en cada territorio cafetero.

La evidencia revisada sugiere, en síntesis, que la literatura converge en torno a una idea central es que la LI genera valor cuando se diseña como sistema integrado y no cuando se implementa como acción reactiva o tecnología aislada. Las diferencias entre autores son de énfasis y no de contradicción, mientras Zohourfazeli et al. priorizan la dimensión operativa del retorno, Mayson y Williams destacan la dimensión de servicio y coordinación, y Scalia et al. subrayan la dimensión metodológica de la selección multicriterio. Estas tres dimensiones son complementarias y necesarias para una conceptualización completa de la LI en el sector cafetero.

### **6.2 Marcos conceptuales relacionados**

La literatura revisada identifica tres marcos conceptuales que dan contexto, amplitud y fundamento normativo a la LI sin ser idénticos a ella, La economía circular (EC), la bioeconomía circular (CBC) y los sistemas de ciclo cerrado. Comprender cómo se relacionan estos conceptos entre sí y con la LI es esencial para interpretar los argumentos de los autores y para no confundir el marco estratégico con el mecanismo operativo.

La economía circular es el más amplio y el más frecuentemente invocado en el corpus revisado. Morsetto (2020) y Andreola et al. (2020) la definen como un modelo económico orientado al uso eficiente de los recursos mediante la minimización de residuos, la retención de valor a largo plazo y los ciclos cerrados de productos, partes y materiales. Desde esta perspectiva, la LI es el mecanismo operativo que hace posible la EC, sin un sistema de retorno que movilice el residuo desde su punto de generación hasta los circuitos de recuperación, la EC permanece como

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

aspiración normativa sin concretarse en práctica. Esta relación al describir la EC como el marco que reorienta el uso de residuos agroindustriales y posconsumo como materias primas para industrias no alimentarias, incluyendo la cerámica. Su aporte fundamental es que la EC no limita el destino del residuo a la misma industria que lo generó, el flujo inverso puede conectar sectores industriales distintos, lo que amplía el portafolio de destinos posibles para los subproductos del café más allá de la propia cadena cafetera y abre oportunidades de diversificación económica para los territorios productores.

Ranjbari et al. (2022), a partir de un análisis bibliométrico de 646 artículos, proponen la bioeconomía circular como extensión específica de la EC hacia el aprovechamiento de biomasa y residuos orgánicos. Su aporte más relevante para la LI es que la CBC reconoce explícitamente que mover la materia residual desde su punto de generación hasta los circuitos de valorización requiere infraestructura de acopio, clasificación y transformación, es decir, un sistema logístico de retorno cuyo diseño es una condición previa a la posibilidad de cualquier ruta de valorización. En la CBC, el residuo deja de ser un costo de disposición y pasa a ser un recurso logístico, cambio de perspectiva que es exactamente el que define el objeto de estudio de la LI y que tiene especial pertinencia para el sector cafetero colombiano, donde los subproductos del beneficio húmedo han sido históricamente tratados como externalidades negativas.

Do et al. (2021) profundizan en la dimensión operativa de los sistemas de ciclo cerrado al sistematizar la literatura sobre gestión de pérdidas y desperdicios alimentarios, construyendo un marco de referencia que contrasta los flujos lineales, en los que el residuo tiene un destino único de disposición final, con los sistemas de ciclo cerrado, en los que el residuo es reintroducido al sistema productivo como recurso. Esta distinción es conceptualmente central para la LI porque define el criterio que diferencia un sistema de gestión de residuos convencional de un sistema de

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

LI esta no es la tecnología de transformación sino la arquitectura del flujo, es decir, si el residuo regresa al sistema productivo o abandona la cadena de manera definitiva. Esto permite decir que la LI es una decisión de diseño sistémico antes de ser una decisión tecnológica, lo que tiene profundas implicaciones para la priorización de políticas e inversiones en el sector cafetero. En la tabla 4 se dan a conocer los marcos conceptuales que se encontraron en la revisión en la cual se encuentran la definición, su relación con la LI y su implicación para la cadena del sector cafetero.

**Tabla 4**

*Marcos conceptuales relacionados con la logística inversa y su implicación para el sector cafetero*

| <b>Marco</b>                      | <b>Definición sintética</b>   | <b>Relación con la LI</b>  | <b>Implicación sector cafetero</b>  |
|-----------------------------------|---|--|---|
| <b>Economía Circular (EC)</b>     | Modelo orientado al uso eficiente de recursos mediante ciclos cerrados de materiales (Morsetto, 2020)             | La LI es el mecanismo operativo que materializa la EC                      | Repensar integralmente la cadena: del beneficio húmedo hasta la reutilización de empaques |
| <b>Bioeconomía Circular (CBC)</b> | Aprovechamiento específico de biomasa y residuos orgánicos con visión de ciclo cerrado (Ranjbari et al., 2022)    | El diseño logístico es condición previa a toda ruta de valorización        | El residuo cafetero deja de ser costo de disposición y se convierte en recurso logístico  |
| <b>Sistemas de Ciclo Cerrado</b>  | Arquitecturas productivas en que el output de un actor es el input de otro (Do et al., 2021; Dsouza et al., 2021) | Define el criterio arquitectónico que distingue LI de gestión convencional | El flujo de subproductos entre fincas, beneficiaderos y procesadores como red diseñada    |

|  |   |   |   |
|--|---|---|---|
| <b>Cadena de Suministro Sostenible (CSS)</b> | Integración de objetivos ambientales, económicos y sociales en toda la cadena (Khan et al., 2021) | La LI es una función clave dentro de la CSS | Requiere articular productores, cooperativas, exportadores y consumidores finales |
|--|---|---|---|

*Nota.* Elaboración propia

### 6.3 Metodologías para la toma de decisiones en sistemas de LI

Un conjunto significativo de artículos revisados no define la LI directamente, sino que aporta herramientas metodológicas indispensables para tomar decisiones dentro de un sistema de retorno. Estas herramientas cumplen una función crítica en el diseño de sistemas de LI porque permiten comparar alternativas de valorización bajo criterios múltiples y elegir la más adecuada para un contexto específico.

García et al. (2024) aportan la evaluación multicriterio al comparar casos de valorización de biowaste usando un modelo que transforma objetivos ambientales, económicos y técnicos en prioridades operativas comparables. Su utilidad para la LI es que permite justificar ante actores institucionales y financiadores la selección de una ruta de retorno específica frente a sus alternativas, con criterios que van más allá de la preferencia técnica del investigador o del decisor. En el contexto cafetero colombiano, donde la disponibilidad de recursos para inversión es limitada y donde las decisiones de valorización tienen implicaciones para cientos de miles de familias productoras.

Muchangos et al. (2025) complementan el marco de decisión con la metodología de evaluación de impacto ambiental a escala de cadena global del café. Su revisión sistemática de 87 estudios muestra que los mayores impactos de la cadena cafetera se concentran en el uso de fertilizantes y agua en el cultivo, en la generación de aguas residuales en el beneficio húmedo, y en las emisiones de gases de efecto invernadero en la tostación y el transporte. Este mapa de

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

impactos es directamente útil para priorizar los puntos de intervención de un sistema de LI ya que las prácticas de retorno que apuntan a los segmentos de mayor impacto tienen mayor potencial de mejora ambiental neta. Adicionalmente, estos autores señalan la falta de estandarización metodológica en los estudios disponibles, lo que dificulta la comparación entre contextos y constituye un vacío relevante para futuras investigaciones latinoamericanas.

Forcina et al. (2023) añaden la dimensión espacial al calcular distancias de equilibrio ambiental para cada ruta de valorización de SCG, demostrando que la decisión de dónde transformar el residuo no es ambientalmente neutra y que las ventajas de ciertos destinos se erosionan rápidamente cuando las distancias de transporte superan umbrales específicos. La ruta hacia materiales de construcción, por ejemplo, mantiene ventaja ambiental con distancias de recolección de hasta 1.800 kilómetros, lo que la convierte en la de mayor tolerancia logística dentro del portafolio estudiado. Este hallazgo tiene implicaciones directas para el diseño de sistemas de LI en Colombia, donde la orografía andina y la dispersión del sector cafetero imponen costos de transporte que pueden invalidar la ventaja ambiental de ciertas rutas.

### **6.4 Análisis comparativo de enfoques teóricos: similitudes, diferencias y complementariedades**

Una lectura transversal de los artículos revisados en este capítulo permite identificar tres ejes de diferenciación entre los enfoques teóricos de la LI. El primer eje es el nivel de análisis, mientras algunos autores como Zohourfazeli et al. (2025) operacionalizan la LI en decisiones de frecuencia de recolección y capacidad de almacenamiento, otros como Ranjbari et al. (2022) la sitúan en el nivel estratégico de diseño de sistemas de bioeconomía circular. El segundo eje es el tipo de actor protagonista, Mayson y Williams (2021) centran su análisis en el operador del sistema de retorno como actor de coordinación, mientras que García et al. (2024) sitúan en el centro al

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

decisor institucional que evalúa alternativas de política. El tercer eje es la temporalidad, algunos enfoques son simultáneos, describiendo las condiciones de operación de un sistema de LI en un momento dado, mientras que otros como Muchangos et al. (2025) son diacrónicos, trazando la evolución del campo y proyectando tendencias.

Estas diferencias de énfasis no invalidan ninguno de los enfoques, sino que revelan la naturaleza multidimensional de la LI como campo de estudio. La evidencia revisada sugiere que una comprensión completa de la LI en el sector cafetero requiere integrar simultáneamente estas tres perspectivas, la operativa, que resuelve el problema del flujo físico; la estratégica, que diseña el sistema de actores y sus incentivos; y la metodológica, que evalúa y selecciona las alternativas con criterios objetivos y comparables. La ausencia de alguna de estas dimensiones es, con frecuencia, la razón por la que las iniciativas de valorización de subproductos cafeteros no escalan más allá de la escala de laboratorio o de proyecto piloto. Estos autores en sus artículos estudiados en la revisión nos dan a conocer varios enfoques teórico-prácticos relevantes para la LI a continuación la tabla 5 nos da a conocer un cuadro comparativo entre los diferentes autores mostrándonos el concepto central de cada uno, el énfasis principal, el enfoque de su estudio y la relevancia que tiene esta para el sector cafetero.

**Tabla 5**

*Análisis de enfoques teóricos sobre logística inversa en la literatura revisada*

| <b>Autor(es)</b>                  | <b>Concepto central</b>                        | <b>Énfasis principal</b>  | <b>Enfoque</b>      | <b>Relevancia para el café</b>                               |
|-----------------------------------|--|---|---------------------|--|
| <b>Zohourfazeli et al. (2025)</b> | Cadena de suministro circular con LI explícita | Diseño operativo del retorno; sensores IoT para optimización de rutas | Operativo-sistémico | Alta: formaliza el retorno como problema de diseño de flujos |

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

| <b>Autor(es)</b>                    | <b>Concepto central</b>                                | <b>Énfasis principal</b>   | <b>Enfoque</b>             | <b>Relevancia para el café</b>                                    |
|-------------------------------------|--|--|----------------------------|---|
| <b>Mayson &amp; Williams (2021)</b> | Reverse-logistic Product Service Model                 | LI como arquitectura de servicio y coordinación, no solo transporte          | Estratégico-organizacional | Alta: diferencia LI de gestión de residuos convencional           |
| <b>Scalia et al. (2021)</b>         | Opciones de flujo inverso (reverse flow options)       | Evaluación multicriterio de alternativas de retorno según contexto           | Analítico-metodológico     | Alta: convierte la selección de rutas en decisión de ingeniería   |
| <b>Morseletto (2020)</b>            | Economía circular como marco normativo                 | Minimización de residuos, retención de valor, ciclos cerrados                | Conceptual-normativo       | Media-alta: EC como marco que orienta la LI                       |
| <b>Ranjbari et al. (2022)</b>       | Bioeconomía circular (CBC)                             | Biomasa como recurso logístico; infraestructura como condición previa        | Bibliométrico-conceptual   | Alta: reconoce la logística como condición de la valorización     |
| <b>Do et al. (2021)</b>             | Sistemas de ciclo cerrado vs. flujos lineales          | Reintroducción del residuo al sistema productivo como criterio diferenciador | Sistémico-operativo        | Alta: define el criterio que distingue LI de gestión convencional |
| <b>García et al. (2024)</b>         | Evaluación multicriterio de valorización de biowaste   | Justificación objetiva de rutas ante actores institucionales                 | Metodológico-decisional    | Muy alta: especialmente útil en contextos de recursos limitados   |
| <b>Muchangos et al. (2025)</b>      | Análisis de ciclo de vida de la cadena cafetera global | Mapa de impactos para priorizar puntos de intervención logística             | Ambiental-sistémico        | Alta: permite focalizar la LI en segmentos de mayor impacto       |

*Nota.* Elaboración propia.

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

### 6.5 Definición de logística inversa aplicada al sector cafetero colombiano

A partir de la síntesis de los enfoques analizados, este trabajo propone una definición integradora de la logística inversa específicamente orientada al sector cafetero, que recoge las dimensiones operativa, estratégica y metodológica identificadas en la literatura:

*La logística inversa en el sector cafetero es un sistema planificado de flujos de retorno que captura, acondiciona, transporta y entrega los subproductos y residuos generados en las diferentes etapas de la cadena del café el cultivo, beneficio, trilla, tostación y consumo hacia procesos de recuperación de valor, con el propósito de reintroducirlos en el sistema productivo o en cadenas de valor alternativas. Este sistema integra decisiones operativas sobre recolección, almacenamiento y transporte; decisiones estratégicas sobre la coordinación entre actores y la distribución de los beneficios del retorno; y decisiones metodológicas sobre la selección de rutas de valorización mediante criterios ambientales, económicos y logísticos adaptados a las condiciones específicas de cada territorio cafetero.*

Esta definición amplía y operacionaliza el concepto de LI más allá de su acepción genérica como gestión de flujos de retorno, incorporando las condiciones particulares del sector cafetero colombiano como la dispersión geográfica, la estacionalidad de los residuos, la diversidad de actores involucrados y la necesidad de criterios de selección de rutas que sean aplicables en contextos de recursos limitados. Al mismo tiempo, conecta la LI con los marcos normativos de la economía y la bioeconomía circulares, posicionándola como el mecanismo operativo que une estos principios en la cadena productiva del café.

### **6.6 Vacíos investigativos y limitaciones del corpus conceptual**

El análisis del corpus conceptual permite identificar al menos dos vacíos investigativos de relevancia para la agenda académica en logística inversa cafetera. En primer lugar, la literatura revisada está dominada por estudios europeos, especialmente italianos y británicos, lo que genera un sesgo de contexto institucional, de infraestructura y de marcos regulatorios que no es directamente transferible al entorno de la caficultura colombiana. La escasez de trabajos latinoamericanos sobre LI en café no refleja la ausencia del problema, sino la ausencia de investigación sistemática sobre él, lo que representa una oportunidad de contribución académica de primer orden.

En segundo lugar, la mayoría de los marcos conceptuales revisados asumen la disponibilidad de un residuo con calidad y volumen relativamente estables, condición que no se cumple en el sector cafetero colombiano, donde la alta estacionalidad de la cosecha, la variabilidad climática y la diversidad de variedades producen residuos con composición heterogénea entre lotes, temporadas y regiones. Esta diferencia no ha sido suficientemente incorporada en los modelos de diseño de sistemas de LI disponibles en la literatura, lo que constituye un vacío metodológico con implicaciones prácticas directas.

## **7. Rutas de valorización: análisis comparativo por aplicación tecnológica**

El presente capítulo desplaza el análisis desde la dimensión conceptual de la LI hacia su expresión tecnológica concreta enseñando las rutas mediante las cuales los subproductos del café principalmente los spent coffee grounds (SCG), la pulpa, la *silverskin*, el husk y el parchment son transformados en productos de valor.

### **7.1 Digestión anaerobia y producción de biogás: la ruta de mayor integración de ciclos**

La digestión anaerobia (DA) para producción de biogás es la familia de aplicaciones más ampliamente documentada en el corpus revisado, y también la que mejor combina el aprovechamiento energético con el cierre del ciclo de nutrientes mediante la generación de digestato como fertilizante orgánico. Esta doble función energética y agronómica es la que explica su prevalencia en la literatura y su potencial de implementación en contextos rurales donde la autosuficiencia energética y la reducción del costo de insumos son prioridades simultáneas.

Dias et al. (2023) aportan la contribución más detallada en términos de parámetros de proceso al analizar la influencia de la relación inóculo-sustrato (ISR) y el contenido de sólidos sobre el potencial de metano de SCG industriales. Sus resultados son técnicamente precisos, las condiciones óptimas en torno a ISR 1,36 y 14,83 g de sólidos volátiles por litro permiten alcanzar potenciales de metano entre 331 y 413 ml CH<sub>4</sub> por gramo de sólidos volátiles. Para el diseño de sistemas de LI, esta evidencia implica que el acondicionamiento del residuo antes del proceso más que la tecnología del digestor es el determinante crítico del rendimiento, lo que introduce un requisito de estandarización dentro del sistema logístico que va más allá del simple transporte.

La co-digestión anaerobia emerge como estrategia de mejora cuando los residuos cafeteros puros presentan desequilibrios en la relación carbono-nitrógeno o acumulación de inhibidores. Sousa et al. (2021) demuestran que la mezcla de residuos de la industria de café soluble con purín porcino y residuos cerealistas mejora la estabilidad del proceso biológico y aumenta la producción de biogás respecto a la digestión de sustratos individuales. Abouelenien et al. (2016) exploran la co-digestión seca con gallinaza, un proceso que opera con contenidos de sólidos totales superiores al 20%, lo que reduce el volumen del digestor necesario y facilita el manejo del coproducto. Estas dos variantes abren oportunidades específicas para regiones cafeteras colombianas donde la

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

porcicultura o la avicultura coexisten geográficamente con la caficultura, aunque requieren mecanismos de coordinación logística entre sectores que históricamente no operan de manera integrada. Czekala et al. (2023) cuantifican el potencial bioenergético de los residuos cafeteros tanto de producción como de consumo. Según el estudio, la cáscara de café genera 329,5 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de materia fresca, mientras que los pozos de café usados producen entre 225 y 271 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada., ofreciendo datos de producción de metano por unidad de masa que permiten dimensionar instalaciones para diferentes escalas de procesamiento.

### **7.2 Rutas termoquímicas: pirolisis, torrefacción y gasificación**

Las rutas termoquímicas representan una alternativa complementaria a la digestión anaerobia, especialmente adecuada cuando el SCG tiene bajo contenido de humedad o cuando las condiciones del entorno favorecen el procesamiento térmico sobre el biológico. Su ventaja principal es la capacidad de producir biocombustibles sólidos de alta densidad energética que pueden ser almacenados y transportados con mayor facilidad que el biogás, aunque a costa de mayor complejidad tecnológica y requerimiento de infraestructura.

Lee et al. (2021) optimizan la producción de *biochar* como biocombustible sólido mediante pirolisis de SCG, caracterizando rendimientos y propiedades energéticas del producto estos obtuvieron un *biochar* con un rendimiento del 29,94 % y rendimiento energético del 41,60 %. El producto final presenta un alto contenido de carbono (80,35 %), bajo contenido de volátiles y cenizas, y un poder calorífico superior (aproximadamente 1,4 veces mayor que el SCG crudo), con excelentes propiedades como biocombustible sólido. Matrapazi y Zabaniotou (2020) avanzan un paso más al evaluar la viabilidad técnica y económica de una planta de pirolisis alimentada con flujos de SCG provenientes de cafeterías, demostrando que el acopio, la consolidación y la entrega organizada de los residuos son condiciones necesarias para que el proceso sea económicamente

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

sostenible. Este hallazgo refuerza un argumento recurrente en este capítulo que la tecnología de conversión solo funciona cuando el sistema logístico de abastecimiento garantiza volumen, regularidad y calidad del residuo.

Vakalis et al. (2019) formalizan esta lógica al proponer el concepto 'COFFEE BIN', un esquema de recolección municipal centralizada de SCG con tratamiento térmico posterior mediante torrefacción, cuyo objetivo explícito es desarrollar un sistema de recuperación a escala urbana que elimine la aleatoriedad del suministro del residuo y genere economías de escala. Estos tres trabajos ilustran una progresión desde el diseño del proceso de conversión hasta el diseño del sistema logístico que lo abastece, que es exactamente el trayecto que la LI recorre. Aljomard et al. (2024) amplían el enfoque al proponer la co-pirolisis de SCG con residuos plásticos PET, reportando un rendimiento máximo de *biochar* del 71,33% bajo condiciones específicas. Papamatthaiakis et al. (2025) exploran la licuefacción hidrotermal de *silverskin* y SCG para producir hidrochar con contenido energético superior a 33 MJ/kg, ampliando las rutas de biorrefinería hacia tecnologías de mayor valor agregado. Pacioni et al. (2016) complementan el portafolio con la gasificación con vapor para convertir SCG y otros residuos agroindustriales en syngas, aunque esta tecnología presenta la mayor complejidad de implementación y los mayores requerimientos de inversión dentro del conjunto de rutas termoquímicas.

Desde la perspectiva de la viabilidad en Colombia, las rutas termoquímicas enfrentan dos barreras principales que la evidencia revisada no resuelve completamente. La primera es la necesidad de secar el residuo antes de lo que implica un paso adicional de acondicionamiento con costo energético significativo en el contexto cafetero. La segunda es la escala mínima de operación económicamente viable, que la evidencia de Matrapazi y Zabaniotou (2020) sitúa en niveles

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

difícilmente alcanzables con la generación de SCG de una finca individual, lo que exige sistemas de acopio y consolidación a escala de municipio o asociación de productores.

### **7.3 Biocombustibles líquidos: potencial de alto valor con alta complejidad técnica**

Los biocombustibles líquidos y gaseosos de segunda generación completan el panorama energético de la valorización cafetera. Karmee et al. (2018) presentan la conversión de aceite extraído de SCG en biodiesel mediante catálisis enzimática, reportando rendimientos cercanos al 95% con adición fraccionada de metanol. La extracción lipídica previa es el paso determinante de esta ruta: el SCG contiene entre el 10% y el 15% de aceite en base seca, lo que requiere procesos de extracción con solventes o mecánicos antes de la transesterificación para obtener biodiesel.

Akinola et al. (2025) demuestran una ruta diferente al emplear SCG como sustrato para producir biohidrógeno y biobutanol mediante fermentación con *Clostridium beijerinckii*, conectando la LI del café con la industria de biocombustibles de segunda generación. La evidencia revisada sugiere que, aunque estas rutas tienen rendimientos técnicos prometedores, su complejidad tecnológica y sus requerimientos de control de proceso son significativamente superiores a los de la digestión anaerobia, lo que las posiciona como opciones de mediano plazo en el contexto colombiano, condicionadas a la disponibilidad de capacidad analítica e infraestructura industrial que actualmente no existe a escala productiva en las regiones cafeteras.

### **7.4 Materiales de construcción y manufactura: una ruta de alta tolerancia logística**

La valorización de SCG hacia la producción de materiales de construcción aprovecha propiedades físicas específicas del residuo: su porosidad, su contenido de carbono y su baja conductividad térmica. Lo que distingue esta ruta del resto es su característica de alta tolerancia logística documentada por Forcina et al. (2023), la ruta hacia materiales de construcción mantiene ventaja ambiental neta con distancias de recolección de hasta 1.800 kilómetros, la más alta dentro

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

del portafolio estudiado, lo que la convierte en viable incluso en contextos de alta dispersión geográfica de la generación del residuo.

Saeli et al. (2022) demuestran que la incorporación de SCG en morteros base cal para *termoplasters* reduce la conductividad térmica del material, con mejores resultados en proporciones de adición cercanas al 10%. Lombardo et al. (2024) validan esta ruta en una aplicación real en un edificio patrimonial en Sicilia, reportando una mejora del 11% en desempeño energético frente a enlucidos tradicionales. Biswal et al. (2024) exploran una aplicación industrial alternativa al demostrar que SCG tratado puede incorporarse como agente reductor en pellets compuestos para la reducción de hematita en procesos siderúrgicos, ilustrando que el SCG puede conectarse con sectores de manufactura intensivos en energía y materiales, ampliando el mercado potencial más allá de la construcción. Sölar et al. (2025) aplican la misma lógica en la industria textil al incorporar residuos de café y té en superficies textiles funcionales.

Desde la perspectiva colombiana, esta ruta es especialmente interesante porque no requiere certificaciones sanitarias tan exigentes como las rutas alimentarias, puede articularse con el creciente mercado de construcción sostenible, y su alta tolerancia logística reduce la presión sobre la dispersión geográfica del sector cafetero. La brecha principal es la ausencia de estudios de validación realizados con subproductos de variedades y regiones colombianas específicas.

### **7.5 Biorrefinería y compuestos bioactivos: la ruta de mayor valor potencial**

Las aplicaciones de biorrefinería representan las de mayor potencial de creación de valor económico, al aprovechar las propiedades químicas y biológicas específicas del SCG para producir compuestos bioactivos, materiales funcionales y biomasa de alto valor. Schmidt Rivera et al. (2020) aportan múltiples rutas de valorización mediante análisis de ciclo de vida ambiental,

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

concluyendo que la selección de la alternativa óptima debe basarse en el desempeño ambiental comparado y no únicamente en la factibilidad técnica.

Yeoh y Ng (2022) profundizan en el enfoque de biorrefinería al comparar configuraciones de valorización de SCG y mostrar que la coproducción de múltiples productos mejora el desempeño económico, aunque con compromisos ambientales que varían entre configuraciones. De especial relevancia para el diseño logístico es su demostración de que la localización de la planta de transformación determina en gran medida el desempeño económico del sistema: una planta integrada en una fábrica de café tiene ventajas claras sobre una instalación independiente porque elimina los costos de transporte del residuo. Jomnonkhaow et al. (2024) llevan esta lógica al nivel de proceso al proponer un bioproceso en cascada que obtiene azúcares fermentables, ácidos grasos volátiles, proteína unicelular y bioenergía a partir de una misma unidad de SCG, maximizando el valor extraído por unidad de masa de residuo.

Rebollo-Hernanz et al. (2023) articulan el argumento de la biorrefinería de manera sistemática al demostrar que los subproductos generados en el origen agrícola —pulpa, mucílago, cascarilla— pueden transformarse en ingredientes funcionales y nutracéuticos mediante una estrategia secuencial de extracción que primero recupera ácidos clorogénicos y polifenoles, luego pectinas y fibras estructurales, y finalmente destina los residuos a compostaje o bioenergía. Esta estrategia es la expresión más completa del principio de jerarquía de residuos aplicada al café: antes de destinar un subproducto a la vía de menor valor, se agotan las rutas de mayor valor que la misma biomasa puede sostener. Mirón-Mérida et al. (2021) complementan esta visión al caracterizar la biorrefinería como estrategia de economía circular y explicitar que la recolección diferenciada, la separación de fracciones y la purificación son condiciones previas insoslayables para su viabilidad.

### **7.6 Aplicaciones biológicas y de remediación ambiental: las rutas más accesibles para pequeña escala**

Las aplicaciones biológicas principalmente el cultivo de hongos comestibles y medicinales sobre SCG, la producción de enzimas mediante fermentación en estado sólido y la remediación de contaminantes mediante *biochar* son las rutas de menor complejidad tecnológica y mayor accesibilidad para operadores de pequeña escala, lo que las hace especialmente relevantes para el contexto del sector cafetero colombiano.

Akçay et al. (2025) emplean SCG como sustrato para el cultivo de *Ganoderma lucidum*, hongo con reconocidas propiedades medicinales y mercado creciente en la industria nutracéutica, transformando el residuo lignocelulósico en biomasa comercializable. Stapel et al. (2025) aplican la misma lógica con *Pleurotus*, reafirmando que el cultivo de hongos comestibles sobre SCG es una de las rutas de menor complejidad técnica y de mayor accesibilidad. Tran et al. (2025) evalúan SCG como sustrato para producción de amilasa industrial mediante fermentación en estado sólido, ubicándolo dentro de una familia más amplia de sustratos aptos para bioprocesos de producción de enzimas.

Budžaki et al. (2022) demuestran que SCG puede convertirse en soporte para la inmovilización de lipasa, una enzima de alto valor en biocatálisis. Wang et al. (2022) convierten SCG en *biochar* modificado con óxido de hierro para la remoción de antibióticos del agua, con altas capacidades de adsorción que lo posicionan como herramienta de remediación ambiental de alta demanda potencial. Manogaran et al. (2022) demuestran la incorporación de SCG en bio-baterías derivadas de vermicompost, mientras que Griffin et al. (2018) exploran procesos de reducción de tamaño de partícula hasta escala nanométrica para producir nano suspensiones con propiedades antimicrobianas, una aplicación de alto valor que requiere tecnología especializada, pero abre la puerta a mercados de materiales avanzados. Estos autores son notables por reconocer

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

explícitamente los condicionantes logísticos de la viabilidad de la valorización, incluyendo la clasificación del residuo, el transporte, la estacionalidad y la velocidad de deterioro del SCG.

Hnydiuk-Stefan et al. (2023) introducen una dimensión crítica al analizar la acumulación de contaminantes en la biomasa fúngica producida sobre SCG, estableciendo que el retorno del residuo a la cadena alimentaria requiere no solo demostrar eficacia productiva sino también garantizar que el material no transfiere contaminantes al producto final. Este requisito de control de calidad del material retornado es un componente del diseño de sistemas de LI que la mayoría de los artículos de valorización no aborda.

### **7.7 Factores transversales que determinan la viabilidad de los sistemas de logística inversa**

Más allá de las características técnicas de cada ruta, la literatura revisada identifica un conjunto de factores transversales que determinan si la LI puede operar de manera sostenida y a escala, independientemente de la tecnología de conversión elegida. Alfarizi et al. (2023) demuestran, mediante un modelo de ecuaciones estructurales (PLS-SEM), que el conocimiento, la conciencia y la actitud del operador en

el punto de generación del residuo son los determinantes principales de las prácticas de separación y almacenamiento previo al retorno. Este hallazgo tiene una implicación directa para el diseño de sistemas de LI: antes de invertir en infraestructura de recolección o en plantas de transformación, es necesario asegurar que el actor en el punto de generación tenga tanto la motivación como la capacidad técnica mínima para separar y almacenar el residuo adecuadamente.

Stufano y Petrillo (2022) abren una perspectiva diferente al demostrar que el SCG puede transformarse en materiales para almacenamiento electroquímico de energía, mostrando que los mercados de destino de los subproductos del café pueden ser más diversos de lo que la literatura

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

técnica especializada en valorización agrícola típicamente contempla. Roy et al. (2023) equilibran este optimismo al sistematizar las restricciones técnicas que limitan la valorización de residuos alimentarios: la alta humedad de los sustratos orgánicos, la variabilidad de su composición entre lotes y temporadas, y el bajo poder calorífico de la biomasa húmeda son barreras recurrentes que los diseños de LI deben abordar explícitamente. Barta et al. (2024) cierran con una propuesta de bio-compuestos de micelio, materiales fabricados a partir de residuos lignocelulósicos colonizados por hongos, que introduce el desempeño ambiental del producto resultante como variable de selección de la ruta de valorización.

A continuación, se presenta un análisis comparativo de las principales rutas tecnológicas para la valorización. La tabla 6 resume cada alternativa según el residuo principal utilizado, su complejidad tecnológica, el impacto ambiental potencial y el nivel de viabilidad actual en Colombia. Esta comparación busca orientar la toma de decisiones sobre cuál ruta resulta más adecuada según el contexto local, la escala de operación y los recursos disponibles.

**Tabla 6**

*Matriz comparativa de rutas de valorización de subproductos cafeteros*

| <b>Ruta</b>                     | <b>Residuo principal</b> | <b>Complejidad tecnológica</b> | <b>Impacto ambiental potencial</b>                     | <b>Viabilidad en Colombia</b>                             |
|---------------------------------|--------------------------|--------------------------------|--|---|
| <b>Digestión anaerobia</b>      | SCG                      | Media                          | Muy alto (biogás + digestato)                          | Media: piloto existe; barrera logística y de coordinación |
| <b>Pirolisis / torrefacción</b> | SCG seco                 | Media-alta                     | Alto (biocombustible sólido, reducción de disposición) | Media-baja: requiere secado previo y escala mínima        |
| <b>Gasificación</b>             | SCG                      | Alta                           | Alto (syngas para calor/electricidad)                  | Baja: alta inversión; sin casos demostrados en            |

| Ruta                                    | Residuo principal              | Complejidad tecnológica | Impacto ambiental potencial                         | Viabilidad en Colombia                                     |
|---|--------------------------------|-------------------------|---|--|
|   |                                |                         |   | café cultura colombiana                                    |
| <b>Biocombustibles líquidos</b>         | Aceite de SCG                  | Alta                    | Alto (sustitución de combustibles fósiles)          | Baja: requiere extracción lipídica especializada           |
| <b>Materiales de construcción</b>       | SCG (termoplasters, morteros)  | Media                   | Medio-alto: reducción de huella de edificaciones    | Media: potencial con alianzas universidad-empresa          |
| <b>Biorrefinería integral</b>           | SCG                            | Muy alta                | Muy alto: múltiples flujos de valor                 | Baja-media: brecha de infraestructura y certificación      |
| <b>Aplicaciones biológicas (hongos)</b> | SCG, residuos lignocelulósicos | Baja-media              | Alto (sustitución de abono, alimento)               | Alta: menor requisito técnico; potencial en pequeña escala |
| <b>Remediación ambiental (biochar)</b>  | SCG                            | Media                   | Muy alto (sorción de contaminantes, mejora edáfica) | Media: articulable con programas de restauración           |
| <b>Co-pirolisis con plásticos</b>       | SCG + residuos PET             | Alta                    | Medio: depende del manejo de emisiones              | Baja: implica articulación con gestión de residuos urbanos |

*Nota. Elaboración propia*

## 8. Análisis de la revisión documental para las aplicaciones de logística inversa en el café en el sector agrícola

El capítulo anterior examinó las prácticas de LI vinculadas principalmente al residuo posconsumo del café los SCG generados en cafeterías, industria de café soluble y hogares. Este capítulo desplaza el foco hacia el origen de la cadena, el campo agrícola y el beneficio del grano. En ese contexto, los residuos son cualitativamente distintos. La pulpa, el mucílago y los efluentes del beneficio húmedo son volúmenes de biomasa fresca y húmeda dispersa en miles de predios,

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

generada de manera estacional y con una velocidad de deterioro que no admite retrasos logísticos. El husk y el parchment son concentrados en trilladoras y beneficiaderos mecanizados, lo que facilita su recolección, pero impone condiciones de almacenamiento más exigentes. Esta naturaleza específica de los residuos agrícolas del café determina tanto las rutas de valorización más pertinentes como las restricciones logísticas y tecnológicas que cualquier sistema de LI debe resolver en este eslabón de la cadena.

Un aspecto que la literatura revisada suele omitir es que el sector cafetero colombiano no es un actor homogéneo. Está compuesto principalmente por pequeños productores el 95% cultiva menos de 5 hectáreas distribuidos en una topografía andina compleja, con baja conectividad vial, acceso desigual a energía y telecomunicaciones, y niveles variables de articulación con el mercado formal a través de cooperativas y la Federación Nacional de Cafeteros (FNC). Esta realidad estructural condiciona profundamente la viabilidad de cualquier práctica de LI y exige que las propuestas de la literatura internacional sean sometidas a un análisis crítico de transferibilidad antes de ser adoptadas como política sectorial.

### **8.1 Impacto ambiental del beneficio húmedo: el punto de partida del sistema de retorno**

El punto de partida de cualquier análisis de LI en el sector agrícola cafetero es el reconocimiento del impacto ambiental de los residuos líquidos del beneficio húmedo, que constituyen el pasivo ambiental más urgente de la cadena y la razón histórica por la cual la gestión de subproductos se convirtió en prioridad pública en las regiones productoras. Ulsido et al. (2025) cuantifican este impacto al analizar cómo los efluentes de múltiples industrias de beneficiado húmedo alteran parámetros críticos de calidad del agua en ríos cercanos, reportando que el agua aguas abajo de las plantas no es apta para consumo humano ni para usos agrícolas o ganaderos, con incrementos sustantivos en la demanda química de oxígeno y en la concentración de ciertos

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

metales. Esta evidencia no es simplemente un dato de calidad ambiental, es el argumento fundamental que justifica que el retorno del residuo hacia rutas de valorización sea prioritario, porque la alternativa genera costos ambientales que deslegitiman cualquier pretensión de circularidad.

Pardo Rocha (2016) aporta el contexto histórico y técnico de este problema en Colombia al revisar las aplicaciones biológicas del mucílago residual producto del beneficio de café. Su trabajo documenta que el mucílago y la pulpa generados en el beneficio húmedo tienen una carga orgánica que supera en varios órdenes de magnitud la de las aguas residuales domésticas, lo que convierte su vertimiento no tratado en una fuente de contaminación hídrica de primer orden en las cuencas cafeteras. Al mismo tiempo, esta alta concentración orgánica es exactamente la que hace atractivo el mucílago como sustrato para procesos de valorización biológica. Esta tensión entre riesgo ambiental y oportunidad de valorización es el núcleo conceptual del diseño de sistemas de LI en el beneficio agrícola del café. el peor defecto del mucílago como residuo es su mejor atributo como materia prima para la LI.

En el contexto colombiano, la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) estableció límites máximos permisibles específicos para el sector cafetero, convirtiendo el tratamiento de efluentes en un requisito legal explícitamente vinculante. Cenicafé desarrolló a lo largo de dos décadas el sistema BECOLSUB (Beneficio Ecológico del Café por Módulos o Unidades de Bajo Impacto Ambiental), que combina el desmucilaginado mecánico con sistemas de tratamiento por etapas estos son tanques de sedimentación, filtros de flujo ascendente y lechos de infiltración, con reducciones documentadas de la carga orgánica del efluente superiores al 90%. Sin embargo, las estimaciones de la FNC indican que alrededor del 60-70% de los cafeteros ha adoptado al menos algún componente de beneficio de bajo impacto,

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

pero la implementación completa del sistema de tratamiento es significativamente menor, especialmente en las regiones de mayor fragmentación predial.

Muchangos et al. (2025) confirman desde una perspectiva global que el beneficio húmedo es uno de los segmentos de mayor impacto ambiental en la cadena cafetera, lo que refuerza la prioridad de intervención en este nodo. La evidencia revisada sugiere que el control ambiental del efluente del beneficio no es una práctica de LI entre otras: es la condición de legitimidad sobre la cual se sostienen todas las demás prácticas, y su implementación incompleta en Colombia constituye la brecha más urgente de cerrar.

### **8.2 Retorno agronómico: cierre del ciclo de nutrientes en el sistema cafetero**

El retorno de subproductos como la pulpa de café al sistema agrícola como insumo productivo es la práctica de LI de mayor disponibilidad técnica y menor costo de implementación en la cadena cafetera. La FNC, a través de Cenicafé, sistematizó el proceso de compostaje de pulpa desde la década de 1980. Sin embargo, la brecha entre la práctica recomendada y la práctica real es amplia, en muchas fincas colombianas, la pulpa se aplica directamente al suelo sin el proceso de compostaje previo que la literatura científica identifica como condición para evitar efectos fitotóxicos.

Zuluaga et al. (2024) establecen la base de esta práctica al caracterizar morfológica y químicamente los SCG como biomasa lignocelulósica con propiedades de enmienda orgánica del suelo, condicionando explícitamente su uso a un proceso de fermentación previa que elimine los compuestos inhibidores del crecimiento vegetal presentes en el material fresco. Vitale et al. (2024) confirman este principio con evidencia experimental al evaluar el uso de SCG como fertilizante en cultivo sin suelo de pepino, demostrando que el polvo de café fresco inhibe el desarrollo de la planta mientras que suspensiones preparadas con treinta días de infusión previa favorecen la

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

biomasa foliar. Esta distinción técnica tiene implicaciones directas: el protocolo de acondicionamiento del residuo antes de su aplicación no es un detalle operativo secundario sino una variable determinante del resultado agronómico y, por tanto, de la viabilidad económica de la práctica. Un sistema de LI que recolecte y distribuya SCG o pulpa sin garantizar el tratamiento previo adecuado no solo no genera valor agronómico, sino que puede causar daño al cultivo receptor.

Sangta et al. (2024) llevan el retorno agronómico hacia un nivel de mayor valor y precisión al demostrar que las pectinas extraídas de la pulpa del café pueden aplicarse como agente de control biológico contra patógenos foliares. Las pectinas actúan como elicitores de las defensas sistémicas de la planta, estimulando sus mecanismos de resistencia contra infecciones fúngicas y bacterianas, sin actuar como plaguicidas directos. Esta modalidad de acción es especialmente relevante para los sistemas de producción de café orgánico y de especialidad porque permite el control fitosanitario sin uso de agroquímicos sintéticos. La aplicabilidad más realista en Colombia sería la creación de unidades de procesamiento a escala regional que concentren la pulpa, extraigan las pectinas mediante procesos de bajo costo y produzcan un extracto aplicable directamente como bioplaguicida foliar.

Hnydiuk-Stefan et al. (2023) introducen una dimensión crítica al analizar la acumulación de contaminantes en la biomasa fúngica producida sobre SCG y residuos cafeteros, estableciendo que el retorno del residuo a la cadena alimentaria requiere no solo demostrar eficacia agronómica sino también garantizar ausencia de contaminantes en el producto final. Este requisito de caracterización y control de calidad del material retornado va más allá del simple aprovechamiento de su valor orgánico y es un componente frecuentemente omitido en los programas de extensión rural.

### **8.3 Valorización bioenergética rural: potencial y condiciones de viabilidad**

Colombia enfrenta un desafío energético estructural en las zonas rurales: muchos municipios cafeteros tienen acceso intermitente o limitado a la red eléctrica nacional, y el costo de la energía para actividades de beneficio —motores eléctricos, secado mecánico y bombeo— es uno de los principales costos variables del proceso productivo. En este contexto, la valorización bioenergética de los residuos del café tiene una lógica económica directa que va más allá de la sostenibilidad ambiental: es una estrategia de reducción de costos operativos y de autonomía energética del productor.

El potencial bioenergético de los residuos cafeteros colombianos es considerable. La pulpa de café tiene un potencial de producción de biometano que, sumado al volumen generado por los aproximadamente 15 millones de sacos producidos anualmente en Colombia, implica una capacidad teórica muy significativa. Sin embargo, este potencial teórico no es completamente aprovechable dada la dispersión geográfica de la producción y las marcadas variaciones estacionales (la cosecha en el Eje Cafetero se concentra entre octubre y diciembre, generando picos de biomasa muy superiores al promedio anual). Czekala et al. (2023) cuantifican el potencial bioenergético de los residuos cafeteros y ofrecen datos de producción de metano por unidad de masa que permiten dimensionar instalaciones para diferentes escalas.

La co-digestión anaerobia con residuos porcinos y cerealistas, analizada por Sousa et al. (2021), es directamente relevante para varias regiones cafeteras colombianas donde la porcicultura coexiste geográficamente con la caficultura. En el Eje Cafetero, Antioquia y partes del Valle del Cauca existe producción porcina significativa que podría articularse con la caficultura en esquemas de co-digestión. La barrera principal es la coordinación logística entre actores de cadenas de valor históricamente no integradas: cafeteros y porcicultores no tienen relaciones comerciales

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

formalizadas ni mecanismos de confianza establecidos, y un esquema de co-digestión requiere acuerdos estables de suministro de sustratos, transporte regular entre predios y un operador común del biodigestor. Estos arreglos institucionales son posibles en el contexto de cooperativas con trayectoria de trabajo colectivo de largo plazo, pero son difíciles de construir donde prevalece la alta atomización e informalidad.

La co-digestión seca propuesta por Abouelenien et al. (2016) con gallinaza tiene ventajas en el contexto colombiano donde la avicultura es complementaria importante especialmente en Valle del Cauca, Cundinamarca y partes de Antioquia. El digestato seco y concentrado que produce este proceso es más fácil de transportar y de aplicar como fertilizante orgánico en los predios cafeteros, lo que puede cambiar radicalmente el cálculo de retorno de la inversión cuando se incorpora el ahorro en fertilizantes sintéticos. La evidencia revisada sugiere que la rentabilidad de los sistemas de biogás a pequeña escala en Colombia debe articularse explícitamente con la cuantificación del ahorro en fertilizantes como parte del cálculo de retorno de la inversión, aspecto que los programas de promoción raramente incluyen de manera sistemática.

### **8.4 Barreras logísticas y estructurales en el sector cafetero colombiano**

El análisis de las prácticas de LI en el sector agrícola cafetero colombiano no estaría completo sin una caracterización honesta de las barreras que limitan su implementación. La literatura revisada identifica barreras en los estudios internacionales, Kassahun et al. (2025) y Laili et al. (2024) son los más explícitos en este punto, que en el caso colombiano adoptan formas específicas vinculadas a la estructura del sector, la topografía andina y las condiciones institucionales del sector. En la tabla 7 se dan a conocer estas barreras acompañadas de la dimensión donde operan, como se manifiestan en el sector cafetero colombiano, los actores afectados y un posible mecanismo de mitigación propuesto en base a la revisión realizada.

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

Tabla 7

*Barreras para la implementación de logística inversa en el sector cafetero colombiano*

| <b>Barrera</b>                    | <b>Dimensión</b>      | <b>Manifestación en el contexto colombiano</b>   | <b>Actores afectados</b>           | <b>Mecanismo de mitigación posible</b>                               |
|-----------------------------------|-----------------------|--|------------------------------------|--|
| <b>Dispersión geográfica</b>      | Logística             | Sector en ladera andina; distancias y pendientes que elevan costos de acopio   | Pequeños productores, cooperativas | Centros de acopio veredal; rutas asociativas de recolección          |
| <b>Inversión inicial</b>          | Financiera            | Sistemas de tratamiento de efluentes: 1,5–4 M COP/finca; inaccesible para ingresos por debajo de 1 SMMLV             | Pequeños y medianos productores    | Créditos blandos FNC, subsidios ambientales CAR, proyectos MDL       |
| <b>Capacidad técnica</b>          | Humano-organizacional | Operación de biodigestores, compostaje controlado y caracterización de subproductos requiere formación especializada | Productores, técnicos rurales      | Programas SENA, extensión Cenicafé, formación por cooperativas       |
| <b>Estacionalidad de residuos</b> | Operativa             | Cosecha concentrada en oct-dic (Eje Cafetero); picos de biomasa muy superiores al promedio anual                     | Todos los actores de la cadena     | Almacenamiento intermedio; biodigestores con capacidad de regulación |

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

| <b>Barrera</b>                     | <b>Dimensión</b> | <b>Manifestación en el contexto colombiano</b>   | <b>Actores afectados</b>                | <b>Mecanismo de mitigación posible</b>                                    |
|------------------------------------|------------------|--|---|---|
| <b>Barreras regulatorias</b>       | Institucional    | Certificación INVIMA para ingredientes; normativa ambiental desigualmente aplicada por las CAR                 | Procesadores, exportadores, innovadores | Mesas sectoriales con INVIMA; armonización con estándares internacionales |
| <b>Fragmentación institucional</b> | Gobernanza       | Ausencia de mecanismos de coordinación entre cafeteros, porcicultores, autoridades y procesadores              | Cadena cafetera completa                | Esquemas de simbiosis industrial bajo liderazgo de FNC o cooperativas     |
| <b>Informalidad del beneficio</b>  | Estructural      | Parte del sector de procesamiento opera sin registros formalizados, lo que impide trazabilidad de subproductos | Beneficiaderos, trilladoras pequeñas    | Formalización progresiva vinculada a acceso a programas de la FNC         |

*Nota.* Elaboración propia

La dispersión geográfica del sector cafetero colombiano es quizá la barrera logística más determinante. La topografía andina incrementa significativamente el costo de transporte del residuo desde el punto de generación hasta los centros de procesamiento, erosionando las ventajas ambientales y económicas de muchas rutas de valorización calculadas bajo condiciones europeas de planicie. Este factor es especialmente crítico para la digestión anaerobia y la biorrefinería, que requieren concentraciones mínimas de biomasa que difícilmente se alcanzan en un radio logístico viable desde una sola finca. La evidencia de Forcina et al. (2023) sobre distancias de equilibrio

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

ambiental, aunque calculadas para el contexto europeo, provee un marco metodológico transferible para calcular los radios viables de recolección en las diferentes regiones cafeteras colombianas, lo que constituye una investigación aplicada de alta relevancia.

La estacionalidad de los residuos agrava la barrera logística. La cosecha cafetera se generan picos de biomasa que son superiores al promedio anual, lo que implica que los sistemas de valorización deben estar diseñados para manejar esta variabilidad: ya sea con capacidad de almacenamiento que amortigüe los picos, o con sistemas flexibles que puedan procesar diferentes sustratos según la época del año. La literatura revisada no ofrece soluciones diseñadas específicamente para esta condición de alta estacionalidad, lo que constituye un vacío metodológico relevante.

### **8.5 Potencial de sistemas circulares: el rol de la FNC, las cooperativas y la academia**

A pesar de las barreras identificadas, el sector cafetero colombiano cuenta con activos institucionales únicos que pueden ser habilitadores de sistemas circulares a una escala que pocos sectores agrícolas en el mundo tienen disponibles. La Federación Nacional de Cafeteros con sus 35 cooperativas departamentales, sus 387 comités municipales de cafeteros y su red de más de 360.000 cafeteros agremiados dispone de la arquitectura institucional necesaria para coordinar la cadena y, potencialmente, para articular intercambios de subproductos entre actores de diferentes eslabones.

El concepto de Eco-Industrial Park (EIP) cafetero, identificado por Kassahun et al. (2025) y Laili et al. (2024), es la expresión más desarrollada de la visión de sistemas circulares en la literatura, pero su implementación en Colombia requiere adaptaciones fundamentales. En el Eje Cafetero, específicamente en el triángulo Manizales-Armenia-Pereira y sus municipios aledaños, se dan condiciones favorables como la alta densidad de actores de todos los eslabones en un radio

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

geográfico reducido de menos de 100 kilómetros, existencia de instituciones de investigación como Cenicafé, la Universidad de Caldas, la Universidad Tecnológica de Pereira y el SENA, y disponibilidad de infraestructura de procesamiento como trilladoras y plantas de café soluble. Esta región ofrece las condiciones más favorables para un primer caso de éxito documentado de sistema circular cafetero en Colombia.

La estrategia más viable para avanzar no es un diseño de sistema circular a escala nacional, sino la creación y documentación rigurosa de casos de éxito a escala regional que generen aprendizaje transferible. La sistematización de estos casos debe incorporar explícitamente los componentes logísticos (rutas de recolección, estándares de calidad de los subproductos, mecanismos de precio y contratos de suministro) que son el eslabón faltante entre la generación del residuo y los procesos de valorización. La academia y Cenicafé tienen un rol crítico e insustituible en la validación técnica de estos sistemas, en la formación del capital humano necesario y en la generación de la evidencia empírica que los programas de la FNC requieren para escalar intervenciones con base sólida.

### **8.6 Vacíos investigativos en el contexto colombiano**

El análisis del capítulo permite identificar al menos cuatro vacíos investigativos específicos para el contexto colombiano que la literatura internacional revisada no cubre. Primero, la ausencia de series temporales de composición y volumen de subproductos por región, variedad y sistema de beneficio, que son la base de datos necesaria para cualquier diseño de sistema de LI con base empírica en Colombia. Segundo, la inexistencia de modelos financieros de viabilidad adaptados al sector cafetero, que incorporen la dispersión geográfica, la estacionalidad y la escala real de operación. Tercero, la escasez de estudios que evalúen el comportamiento y la disposición de los pequeños caficultores colombianos frente a las prácticas de LI, lo que impide diseñar estrategias

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

de adopción efectivas. Cuarto, la ausencia de análisis de los costos de transacción necesarios para articular actores de cadenas de valor distintas en esquemas de co-digestión o de diseño de sistemas circulares, lo que deja sin resolver la pregunta de la gobernanza.

### **9. Prácticas de logística inversa más efectivas en el sector cafetero colombiano**

Con el fin de identificar las prácticas de LI más efectivas para el sector cafetero colombiano, se propone un modelo de evaluación multicriterio construido a partir de la revisión sistemática de literatura desarrollada en la investigación. La metodología parte del principio de que la efectividad de una práctica de logística inversa no puede evaluarse únicamente desde indicadores de eficiencia técnica o rendimiento de valorización, sino desde una perspectiva sistémica que integre variables ambientales, logísticas, territoriales, económicas y tecnológicas.

La literatura revisada evidencia que muchas tecnologías presentan resultados positivos en condiciones controladas de laboratorio; sin embargo, su transferencia al contexto cafetero colombiano depende de factores estructurales como el sector cafetero, la dispersión geográfica de los productores, la topografía andina, las limitaciones de infraestructura rural y la baja capacidad de inversión de pequeños caficultores. En consecuencia, el presente análisis introduce el concepto de “efectividad territorial” como categoría analítica central para evaluar prácticas de LI en el sector cafetero. La efectividad territorial de una práctica de LI es su capacidad de generar valor ambiental, económico y social de manera sostenida en un territorio específico, teniendo en cuenta no solo su rendimiento técnico bajo condiciones ideales sino su viabilidad sistémica real cuando se enfrenta a las condiciones estructurales de ese territorio.

Este concepto parte de una constatación empírica, las prácticas con mayor rendimiento técnico medido en laboratorio o en condiciones idóneas no son necesariamente las más efectivas

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

en el territorio cafetero colombiano. Una biorrefinería integral puede producir múltiples compuestos de alto valor y tener el mayor potencial de valorización del portafolio, pero si requiere infraestructura analítica inexistente en las zonas rurales andinas, inversiones inaccesibles para cooperativas y tiempos de retorno superiores a una década, su efectividad territorial es baja en el corto y mediano plazo, con independencia de sus propiedades técnicas.

### 9.1 Modelo multicriterio: definición

El modelo multicriterio de efectividad territorial se basa en ocho criterios de evaluación, organizados en tres grupos funcionales, criterios de desempeño del sistema tecnológico, criterios de compatibilidad territorial y criterios de generación de valor. Cada criterio se evalúa en una escala Likert de 1 a 5, donde 5 representa siempre la condición más favorable para la implementación en el contexto cafetero colombiano estos criterios se encuentran a continuación en la tabla 8.

**Tabla 8**

*Definición de criterios*

| <b>Criterio</b>                | <b>Código</b> | <b>Definición operacional</b>   | <b>Escala (1–5)</b>   |
|--------------------------------|---------------|---|---|
| <b>Impacto ambiental</b>       | <b>IA</b>     | Potencial de reducción de contaminación hídrica y emisiones   | 1= impacto ambiental muy alto; 5= impacto mínimo o negativo                         |
| <b>Complejidad tecnológica</b> | <b>CT</b>     | Nivel de sofisticación técnica requerido para operar el proceso.  | 1=tecnología muy compleja; 5=tecnología simple, manejable sin capacitación avanzada |
| <b>Viabilidad económica</b>    | <b>VE</b>     | Potencial de retorno sobre inversión, acceso a mercados de destino y horizonte de recuperación de costos. | 1=inviable económicamente; 5=retorno claro en <3 años con mercado accesible         |

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

|  |           |   |  |
|--|-----------|---|--|
| <b>Facilidad logística de recolección y transporte</b> | <b>FL</b> | Tolerancia logística: distancias viables, velocidad de deterioro del residuo, facilidad de almacenamiento y transporte.               | 1=logística compleja (residuo perecedero, frío, distancias cortas); 5=logística simple (in-situ o alta tolerancia al transporte) |
| <b>Escalabilidad contextual</b>                        | <b>ES</b> | Capacidad de la práctica de operar a diferentes escalas: finca, vereda, municipio, región.  | 1=solo viable a gran escala industrial; 5=viable a escala de finca individual  |
| <b>Compatibilidad con pequeños productores</b>         | <b>CP</b> | Grado de accesibilidad técnica, financiera y organizacional   | 1=incompatible con pequeños productores; 5=implementable directamente por un productor individual                                |
| <b>Potencial de valorización</b>                       | <b>PV</b> | Valor económico del producto obtenido y capacidad de generar ingresos adicionales o sustitución de insumos de alto costo.             | 1=bajo valor del producto final; 5=múltiples productos de alto valor de mercado  |
| <b>Sostenibilidad</b>                                  | <b>S</b>  | Capacidad de generar beneficios distribuidos en el territorio: empleabilidad local, cierre de ciclos locales, gobernanza comunitaria. | 1=concentra beneficios en pocos actores; 5=beneficios distribuidos, cierra ciclos en el territorio                               |

*Nota.* Elaboración propia.

## 9.2 Matriz de puntuación multicriterio: evaluación de prácticas de logística inversa

La matriz presentada en la figura 8 evalúa las prácticas de LI identificadas en el análisis realizado, aplicando los ocho criterios definidos en el apartado anterior. La puntuación de cada celda resulta de la síntesis de la evidencia disponible en la literatura revisada, adaptada al contexto específico de la caficultura colombiana mediante el principio de efectividad territorial. Las celdas sombreadas en verde oscuro (5) indican condiciones óptimas; en verde claro (4) condiciones favorables; en amarillo (3) condiciones moderadas con barreras identificadas; en naranja (2) condiciones desfavorables con barreras significativas; en rojo (1) condiciones críticas que limitan severamente la viabilidad. impacto ambiental muy alto y multidimensional

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

**Figura 8***Matriz multicriterio de efectividad territorial*

| <b>Práctica de LI</b>  | <b>IA</b> | <b>CT</b> | <b>VE</b> | <b>FL</b> | <b>ES</b> | <b>CP</b> | <b>PV</b> | <b>S</b> | <b>Total</b> | <b>Rank</b> |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|--------------|-------------|
| Compostaje y retorno agronómico de pulpa                       | 4         | 5         | 4         | 5         | 4         | 5         | 3         | 5        | 35           | 1°          |
| Biofertilizantes y enmiendas orgánicas (SCG fermentado)        | 4         | 4         | 4         | 4         | 3         | 4         | 4         | 4        | 31           | 2°          |
| Digestión anaerobia descentralizada (biogás + digestato)       | 5         | 3         | 4         | 3         | 4         | 3         | 5         | 4        | 31           | 3°          |
| Cultivo de hongos comestibles y medicinales (SCG)              | 3         | 3         | 4         | 3         | 3         | 3         | 4         | 3        | 26           | 5°          |
| Materiales de construcción (morteros, termoplasters)           | 4         | 3         | 3         | 5         | 4         | 2         | 3         | 3        | 27           | 4°          |
| Pirolisis y torrefacción (biochar como combustible/enmienda)   | 4         | 3         | 3         | 3         | 3         | 2         | 4         | 3        | 25           | 6°          |
| Biorrefinería integral (compuestos bioactivos y nutraceuticos) | 5         | 2         | 4         | 2         | 2         | 1         | 5         | 2        | 23           | 7°          |
| Biocombustibles líquidos (biodiesel, biohidrógeno, biobutanol) | 4         | 2         | 3         | 2         | 3         | 1         | 4         | 2        | 21           | 8°          |
| Gasificación y rutas termoquímicas avanzadas (syngas)          | 4         | 1         | 2         | 2         | 2         | 1         | 4         | 1        | 17           | 9°          |

Los totales de la matriz multicriterio generan un ranking de efectividad territorial que ordena las nueve prácticas de mayor a menor viabilidad sistémica para el contexto cafetero colombiano este ranking se muestra a continuación en la tabla 9.

**Tabla 9***Ranking de efectividad territorial de prácticas de logística inversa en la caficultura colombiana*

| <b>Posición</b> | <b>Práctica de logística inversa</b>                     | <b>Puntaje</b> | <b>Categoría de viabilidad</b> |
|-----------------|--|----------------|--------------------------------|
| 1°              | Compostaje y retorno agronómico de pulpa                 | 35             | Muy alta viabilidad            |
| 2°              | Biofertilizantes y enmiendas orgánicas (SCG fermentado)  | 31             | Alta viabilidad                |
| 3°              | Digestión anaerobia descentralizada (biogás + digestato) | 31             | Alta viabilidad                |
| 4°              | Materiales de construcción (morteros, termoplasters)     | 27             | Alta viabilidad                |
| 5°              | Cultivo de hongos comestibles y medicinales (SCG)        | 26             | Viabilidad media               |

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

|    |  |    |                  |
|----|--|----|------------------|
| 6° | Pirolisis y torrefacción (biochar como combustible/enmienda)   | 25 | Viabilidad media |
| 7° | Biorrefinería integral (compuestos bioactivos y nutraceuticos) | 23 | Viabilidad baja  |
| 8° | Biocombustibles líquidos (biodiesel, biohidrógeno, biobutanol) | 21 | Viabilidad baja  |
| 9° | Gasificación y rutas termoquímicas avanzadas (syngas)          | 17 | Viabilidad baja  |

El compostaje y el retorno agronómico de la pulpa de café al sistema productivo como enmienda orgánica obtiene la puntuación más alta del modelo porque maximiza los criterios de compatibilidad territorial de manera simultánea y sin compromiso. Esta práctica no requiere infraestructura adicional, opera a escala de finca individual, es técnicamente simple, ha sido sistematizada y validada por Cenicafé desde la década de 1980, y está explícitamente apoyada por los programas de extensión de la FNC. La brecha crítica identificada por Alfarizi et al. (2023) es la disposición y el conocimiento del operador, es la barrera restante más importante, y es una barrera de extensión educativa, no tecnológica.

La producción de biofertilizantes mediante fermentación de SCG es el segundo puesto, mucílago o pulpa extiende la lógica del retorno agronómico hacia un nivel de mayor valor y precisión técnica, como documentan Zuluaga et al. (2024) y Vitale et al. (2024). La puntuación refleja que esta práctica comparte las ventajas del compostaje en términos de baja complejidad y alta adaptabilidad al contexto colombiano, pero añade un ligero incremento en requerimientos técnicos (fermentación controlada durante 30 días mínimo, control de fitotoxicidad) y una mejora en el potencial de valorización. Las pectinas como agentes de biocontrol documentadas por Sangta et al. (2024) representan la expresión más sofisticada de esta ruta, con potencial de ser articulada a sistemas de producción orgánica y de especialidad de mayor valor.

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

La digestión anaerobia para producción de biogás y digestato ocupa el tercer lugar, impulsada principalmente por su excepcional combinación de impacto ambiental (5/5) y potencial de valorización (5/5). Es la única práctica que genera simultáneamente energía, fertilizante y reduce las emisiones de metano del residuo. Los datos de Dias et al. (2023) son potenciales de metano entre 331 y 413 ml CH<sub>4</sub>/g SVS y de Czeakała et al. (2023) son 329,5 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de cáscara estos confirman el alto rendimiento técnico. Su posición en tercer lugar, y no primero, refleja barreras reales en tres criterios, complejidad tecnológica moderada (requiere operación del biodigestor), costos de instalación moderados-altos y la barrera logística del residuo fresco que debe procesarse rápidamente. La co-digestión con residuos porcinos (Sousa et al., 2021) amplía las oportunidades, pero añade complejidad coordinacional que la literatura no resuelve.

La ruta hacia materiales de construcción supera levemente al cultivo de hongos en la puntuación total ocupando el cuarto lugar, principalmente por su característica más distintiva la cual es la tolerancia logística excepcional documentada por Forcina et al. (2023) de hasta 1.800 km con ventaja ambiental neta. Esta característica es directamente relevante para el contexto cafetero colombiano, donde la dispersión geográfica es la barrera logística más determinante. Su posición más alta en el ranking refleja su ventaja sistémica logística, pero su implementación requiere un actor articulador de nivel cooperativo o exportador.

El cultivo de *Ganoderma lucidum* (Akçay et al., 2025) y *Pleurotus* (Stapel et al., 2025) sobre SCG es la práctica con mayor potencial de diferenciación de mercado en el grupo de viabilidad media quedando en el quinto lugar. Su puntaje refleja que tiene ventajas en el potencial de valorización (4/5) ya que el mercado de hongos medicinales y gourmet crece sostenidamente, pero enfrenta barreras en la logística del producto final, la complejidad de las condiciones controladas (temperatura, humedad, luz) y en la inversión en instalaciones.

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

La pirolisis y la torrefacción para producción de biochar como biocombustible sólido o enmienda edáfica representan una transición hacia la zona de viabilidad media-baja del ranking ocupando el sexto lugar. La puntuación de refleja un perfil mixto, buen impacto ambiental (4/5), pero barreras en la compatibilidad con pequeños productores (2/5). Matrapazi y Zabaniotou (2020) establecen que el punto de equilibrio económico requiere escalas de acopio municipal que son difíciles de lograr dado el sector. El esquema COFFEE BIN de Vakalis et al. (2019) ofrece un modelo replicable, pero fue diseñado para contextos urbanos europeos con redes de recolección muy distintas a las rurales andinas.

La biorrefinería integral se posiciona en el séptimo. El residuo final destinado a bioenergía, como proponen Rebollo-Hernanz et al. (2023) y Jomnonkhaow et al. (2024) obtiene el mayor potencial de valorización del portafolio (5/5) pero la puntuación total es de las más baja del ranking. Esta aparente paradoja revela la esencia del concepto de efectividad territorial, el alto potencial de valorización de la biorrefinería es irrelevante si los criterios de requerimientos de infraestructura, costos, adaptabilidad al contexto colombiano y compatibilidad con pequeños productores son todos críticos. Sin planta de extracción analítica, sin certificación INVIMA, sin mercado formal de ingredientes bioactivos en Colombia, el potencial teórico permanece como aspiración.

La producción de biodiesel enzimático (Karmee et al., 2018), biohidrógeno o biobutanol (Akinola et al., 2025) a partir de aceite o fracción fermentable del SCG obtiene el octavo puesto, la segunda puntuación más baja, porque además de los requerimientos tecnológicos avanzados de la biorrefinería añade la barrera del mercado de biocombustibles colombiano, que está regulado y presenta altas barreras de acceso para productores nuevos. La extracción lipídica requiere procesos con solventes o mecánicos que no están disponibles en zonas rurales cafeteras.

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

La gasificación con vapor de SCG y otros residuos cafeteros para producción de syngas (Pacioni et al., 2016) ocupa el último lugar del ranking, la puntuación más baja del portafolio. Esta posición refleja la convergencia de todos los criterios de compatibilidad territorial en sus valores más bajos simultáneamente complejidad tecnológica máxima, sin casos demostrados en caficultura colombiana, requerimiento de planta de gasificación de gran escala e incompatibilidad absoluta con pequeños productores. El único criterio favorable es el impacto ambiental potencial. Esto hace de la gasificación una tecnología de horizonte lejano para el contexto cafetero colombiano, condicionada a la creación de condiciones que aún no existen.

El modelo multicriterio de efectividad territorial demuestra que la jerarquía de prácticas de LI más efectivas para la caficultura colombiana en el contexto actual es: (1) compostaje y retorno agronómico, (2) biofertilizantes y enmiendas orgánicas, (3) digestión anaerobia descentralizada, (4) materiales de construcción y (5) cultivo de hongos. Estas cinco prácticas conforman el portafolio de intervención prioritaria para el corto y mediano plazo, con una distribución que abarca desde la escala de finca individual hasta la cooperativa o alianza municipal.

Las prácticas de posición inferior en el ranking, biorrefinería integral, biocombustibles líquidos y gasificación avanzada no son descartadas sino temporalmente condicionadas, son el horizonte de desarrollo al que el sector debe aspirar a medida que las condiciones de infraestructura, regulación y mercado se crean progresivamente. Pretender implementarlas hoy, antes de haber consolidado las prácticas de la primera capa, es no solo ineficiente sino contraproducente esto concentra recursos escasos en soluciones que no pueden escalar, mientras el pasivo ambiental de los efluentes del beneficio húmedo continúa erosionando los ecosistemas hídricos de las cuencas cafeteras colombianas.

### **10. Difusión de los resultados de la investigación**

Con el fin de compartir los resultados de la presente investigación, se desarrolla un artículo de carácter publicable en el que se incluyen los principales resultados de la presente investigación. Este artículo se encuentra en el Apéndice A.

### **11. Conclusiones**

La presente investigación respondió la pregunta sobre cuáles son las prácticas de logística inversa más efectivas en el sector cafetero colombiano mediante una estrategia metodológica integrada que articuló revisión sistemática de literatura bajo el protocolo PRISMA, análisis conceptual de marcos teóricos, caracterización comparativa de rutas de valorización tecnológica, análisis territorial del sector cafetero colombiano y evaluación multicriterio adaptada al contexto del país. Los hallazgos permiten formular conclusiones que trascienden la síntesis descriptiva de los capítulos precedentes y ofrecen una respuesta argumentada a la pregunta de investigación.

La primera y más estructurante de las conclusiones es que la efectividad de una práctica de logística inversa en el sector cafetero colombiano no puede ser determinada exclusivamente por su rendimiento técnico en condiciones controladas. La revisión evidenció que la literatura internacional dispone de tecnologías con rendimientos técnicos sobresalientes en producción de biogás, compuestos bioactivos, materiales de construcción o biocombustibles sólidos; sin embargo, al someter estos rendimientos al concepto de efectividad territorial propuesto en esta investigación, la jerarquía de alternativas cambia de manera significativa. La efectividad es una propiedad relacional que emerge de la interacción entre el desempeño técnico de la práctica y las condiciones logísticas, económicas, territoriales, ambientales e institucionales del entorno en que se pretende implementar. Esta conclusión tiene implicaciones directas para los tomadores de

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

decisiones, la selección de prácticas debe partir de un diagnóstico territorial honesto y no de la sofisticación tecnológica.

El principal desafío para la implementación de logística inversa en el sector cafetero colombiano no es de naturaleza tecnológica sino sistémica y organizacional. Las barreras más determinantes son la dispersión geográfica de los productores en una topografía andina que eleva los costos de recolección, la alta estacionalidad de los residuos, la fragmentación institucional que impide la articulación de flujos entre actores, la informalidad de una parte del sector de beneficio que obstaculiza la trazabilidad de los subproductos, y la ausencia de modelos integrados de recuperación de valor que distribuyan equitativamente los costos y los beneficios del sistema. Estas barreras han sido sistemáticamente subestimadas por la literatura internacional, cuya mayoría de trabajos asume condiciones de infraestructura y concentración productiva que no corresponden a la realidad del sector cafetero colombiano, hecho que confirma la pertinencia del presente trabajo de grado.

El análisis comparativo de las rutas de valorización demuestra que no existe una práctica de logística inversa óptima universal para el sector cafetero colombiano; cada ruta posee ventajas y limitaciones que dependen del territorio, la escala de operación y el horizonte temporal de la intervención. La digestión anaerobia emerge como la ruta de mayor integración de ciclos, al generar simultáneamente energía, fertilizante orgánico y reducción de emisiones. Los materiales de construcción representan la ruta de mayor tolerancia logística, con ventaja ambiental neta documentada para distancias de hasta 1.800 kilómetros, lo que la hace especialmente robusta ante la dispersión geográfica del sector. Las biorrefinerías de compuestos bioactivos y nutracéuticos constituyen la alternativa de mayor valor económico potencial, pero están condicionadas a la creación previa de infraestructura que actualmente no existe en la cadena cafetera colombiana a

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

escala productiva. Las aplicaciones biológicas como el cultivo de hongos y la producción de biofertilizantes representan la opción de mayor accesibilidad para pequeños productores. El compostaje y el retorno agronómico de la pulpa obtienen la puntuación más alta del modelo multicriterio por maximizar simultáneamente la compatibilidad territorial, la accesibilidad para el pequeño caficultor y el impacto ambiental inmediato.

Los hallazgos se articulan con los principios de economía circular, bioeconomía circular y cadenas de suministro sostenibles al confirmar que la logística inversa es el mecanismo operativo que permite materializar estos marcos en la práctica. Sin un sistema planificado de retorno que movilice los subproductos desde su punto de generación hasta los circuitos de valorización, la economía circular permanece como aspiración normativa. Esta conexión es también conecta con los ODS 12 y 13, la transformación de los residuos del beneficio húmedo en recursos valorizados reduce la contaminación hídrica de las cuencas cafeteras, disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero, genera valor económico adicional en territorios rurales y fortalece la competitividad del café colombiano en mercados internacionales que demandan evidencia creciente de prácticas sostenibles verificables.

En síntesis, las prácticas de logística inversa más efectivas para la caficultura colombiana en el contexto actual son, por orden de prioridad el compostaje y el retorno agronómico de los residuos del sector cafetero, los biofertilizantes y enmiendas orgánicas mediante fermentación controlada, y la digestión anaerobia descentralizada, complementadas en el mediano plazo por la valorización hacia materiales de construcción y el cultivo de hongos. Las rutas de mayor potencial económico como la biorrefinería integral, los biocombustibles líquidos y las rutas termoquímicas avanzadas no se descartan, sino que se posicionan como horizontes de largo plazo condicionados

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

a la construcción progresiva de las condiciones de infraestructura, regulación, mercado y capacidad institucional que hoy son insuficientes.

### **12. Recomendaciones**

Las recomendaciones se derivan directamente de los hallazgos del análisis conceptual, el análisis territorial y la evaluación multicriterio. La Federación Nacional de Cafeteros, en tanto actor central con capacidad normativa, financiera y de extensión, debe liderar el diseño de una política explícita de gestión de subproductos cafeteros que incorpore un mapa de rutas de valorización diferenciadas por región, subproducto y escala de operación. Esta política debe estar sustentada en un sistema de información sobre flujos de subproductos y residuos a nivel municipal que registre volúmenes, composición básica, estacionalidad y destino actual de los residuos del beneficio, información que hoy no existe de manera sistemática en Colombia y cuya ausencia impide el diseño racional de sistemas circulares territoriales. Paralelamente, la FNC y las cooperativas departamentales deben explorar la creación de centros de acopio y acondicionamiento de subproductos a escala municipal o veredal, articulados con la red de comités municipales de cafeteros, que resuelvan el problema de consolidación de residuos dispersos en miles de fincas de pequeña escala y operen como nodos logísticos intermedios entre la generación del residuo y los procesos de valorización.

La recomendación más urgente para los productores es la adopción plena del compostaje controlado de pulpa de café como práctica estándar en la finca, diferenciándola claramente de la aplicación directa de pulpa cruda que la evidencia identifica como causa de efectos fitotóxicos. Esta práctica no requiere inversión significativa y genera beneficios directos mediante la reducción del uso de fertilizantes sintéticos y la mejora de la estructura del suelo. Para las asociaciones con

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

mayor capacidad organizativa, se recomienda explorar la instalación de biodigestores comunitarios a escala veredal que resuelvan la barrera de escala mínima del biodigestor individual. Los productores orientados hacia mercados de especialidad y certificaciones orgánicas deben considerar el cultivo de hongos comestibles y medicinales sobre residuos del beneficio como práctica de diversificación de ingresos con requerimientos técnicos accesibles y mercado regional en crecimiento.

Para las futuras investigaciones se articula en cuatro líneas prioritarias. Primera, estudios empíricos de viabilidad económica y sostenibilidad operativa de largo plazo para los modelos de logística inversa prioritarios, considerando las condiciones específicas de dispersión geográfica, estacionalidad de residuos y costos de transporte en topografía andina colombiana. Segunda, diseño y evaluación de modelos de infraestructura de acopio y consolidación de subproductos a escala municipal, incluyendo análisis de localización óptima, costos de inversión y operación, y modelos de gobernanza colectiva. Tercera, análisis del comportamiento, las motivaciones y las barreras percibidas de los pequeños caficultores colombianos frente a las prácticas de logística inversa, mediante metodologías cualitativas y cuantitativas situadas en regiones cafeteras representativas. Cuarta, diseño, implementación y documentación rigurosa de un piloto de sistema circular cafetero a escala regional en el Eje Cafetero, que integre múltiples prácticas de logística inversa y genere evidencia transferible para otras regiones del país.

**Referencias bibliográficas**

- Abouelenien, F., Namba, Y., Nishio, N., & Nakashimada, Y. (2016). Dry co-digestión of poultry manure with agriculture wastes. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 178(5), 932–946. <https://doi.org/10.1007/s12010-015-1919-1>
- Akcay, C., Arslan, R., & Ceylan, F. (2025). Valorization of various lignocellulosic wastes to *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst (Reishi Mushroom) cultivation and their FT-IR assessments. *PloS One*, 20(7), e0328732. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0328732>
- Akinola, S. A., Saba, B., Christy, A., Cornish, K., & Ezeji, T. C. (2025). Biohydrogen and biobutanol production from spent coffee and tea waste using *Clostridium beijerinckii*. *Fermentation*, 11(4), 177. <https://doi.org/10.3390/fermentation11040177>
- Alfarizi, M., Lindiasari Samputra, P., & Isnaeni Dwi Arista, N. (2023). Role of entrepreneur's perspective of waste management for coffee shop sustainability. *Problems and perspectives in management*, 21(4), 502–515. [https://doi.org/10.21511/ppm.21\(4\).2023.38](https://doi.org/10.21511/ppm.21(4).2023.38)
- Aljomard, H., Inayat, A., Jamil, F., Khalil, A. K. A., Ghenai, C., & Kalfat, R. (2024). Parametric study and optimization for the co-pyrolysis of plastic waste and spent coffee ground for *biochar* production using response surface methodology. *Chemistry Africa*, 7(5), 2749–2765. <https://doi.org/10.1007/s42250-024-00907-4>
- Andreola, F., Lancellotti, I., Manfredini, T., & Barbieri, L. (2020). The circular economy of agro and post-consumer residues as raw materials for sustainable ceramics. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 17(1), 22–31. <https://doi.org/10.1111/ijac.13396>
- Barta, D.-G., Simion, I., Tiuc, A.-E., & Vasile, O. (2024). Mycelium-based composites as a sustainable solution for waste management and circular economy. *Materials*, 17(2). <https://doi.org/10.3390/ma17020404>

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

- Biswal, S., Pahlevani, F., Wang, W., & Sahajwalla, V. (2024). Reduction behavior of hematite-biowaste composite pellets at melting temperature. *Steel Research International*, 95(2). <https://doi.org/10.1002/srin.202300454>
- Budžaki, S., Velić, N., Ostojčić, M., Stjepanović, M., Rajs, B. B., Šereš, Z., Maravić, N., Stanojević, J., Hessel, V., & Strelec, I. (2022). Waste management in the agri-food industry The conversion of eggshells, spent coffee grounds, and brown onion skins into carriers for lipase immobilization. *Foods* (Basel, Switzerland), 11(3), 409. <https://doi.org/10.3390/foods11030409>
- Chico-Proano, A., Nicolalde, J. F., Boada, M., Bonilla, O., Riofrio, C., Cueva, J. A., Rodríguez-Clavijo, F., Bolaños-Belalcazar, J., Suárez-Beltrán, C., Sandoval, R. M. A., Diaz, H., & Martínez-Gómez, J. (2025). *Biochar* from waste coffee *husk* as a thermal conductivity enhancer in palm stearin BPCMs. *Carbon Trends*, 19(100501), 100501. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100501>
- Czekała, W., Łukomska, A., Pulka, J., Bojarski, W., Pochwatka, P., Kowalczyk-Juško, A., Oniszczyk, A., & Dach, J. (2023). Waste-to-energy Biogás potential of waste from coffee production and consumption. *Energy* (Oxford, England), 276(127604), 127604. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127604>
- De Felice, F., Rehman, M., Petrillo, A., Ortiz Barrios, M. A., & Baffo, I. (2025). Integrating IoT and circular economy in Textile supply chains A closed-loop model for sustainable production using recycled PET and spent coffee grounds. *Journal of Cleaner Production*, 501(145277), 145277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145277>
- Dias, M. E. S., Takeda, P. Y., Fuess, L. T., & Tommaso, G. (2023). Inoculum-to-substrate ratio and solid content effects over in natura spent coffee grounds anaerobic digestion. *Journal*

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

- of Environmental Management, 325(Pt B), 116486.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116486>
- Do, Q., Ramudhin, A., Colicchia, C., Creazza, A., & Li, D. (2021). A systematic review of research on food loss and waste prevention and management for the circular economy. *International Journal of Production Economics*, 239(108209), 108209.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108209>
- dos Muchangos, L. S., Mejia, C., Gupta, R., Sadreghazi, S., & Kajikawa, Y. (2025). A systematic review of life cycle assessment and environmental footprint for the global coffee value chain. *Environmental Impact Assessment Review*, 111(107740), 107740.  
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107740>
- Dsouza, A., Price, G. W., Dixon, M., & Graham, T. (2021). A conceptual framework for incorporation of composting in closed-loop urban controlled environment agriculture. *Sustainability*, 13(5), 2471. <https://doi.org/10.3390/su13052471>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2021). Informe de gestión 2020–2021. Federación Nacional de Cafeteros <https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/inf-fnc/article/view/764/961>
- Federación Nacional de Cafeteros. (2024). Informe mensual de exportación Diciembre 2024. <https://federaciondecafeteros.org/app/uploads/2025/01/Informe-Expos-Diciembre-24.pdf>
- Fernanda, P. R. L. (2016). Aplicaciones biológicas del mucilago residual producto del beneficio de café. <https://noesis.uis.edu.co/items/5664bcc4-e052-45ce-aa35-3cd631571423>
- Fernández Cortés, Y., et al. (2020). Impactos ambientales de la producción del café y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados.  
<https://doi.org/10.22507/pml.v15n1a7>

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

- Forcina, A., Petrillo, A., Travaglioni, M., di Chiara, S., & De Felice, F. (2023). A comparative life cycle assessment of different spent coffee ground reuse strategies and a sensitivity analysis for verifying the environmental convenience based on the location of sites. *Journal of Cleaner Production*, 385(135727), 135727. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135727>
- García, C. D., Díaz, M., Laborda, E., Pérez, M., & Pekakis, P. (2024). Multicriteria approach for evaluating biowaste-valorization cases. *Energy Storage and Saving*, 3(4), 288–294. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.06.002>
- Gil-Gómez, J.A., Florez-Pardo, L.M. & Leguizamón-Vargas, Y.C. Valorization of coffee by-products in the industry, a vision towards circular economy. *Discov Appl Sci* 6, 480 (2024). <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06085-9>
- Griffin, S., Sarfraz, M., Farida, V., Nasim, M. J., Ebokaiwe, A. P., Keck, C. M., & Jacob, C. (2018). No time to waste organic waste Nanosizing converts remains of food processing into refined materials. *Journal of Environmental Management*, 210, 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.084>
- Gutiérrez, P. A. (2021). Implementación de la logística inversa como ventaja competitiva en las industrias cafeteras del Huila [Trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio Institucional UCC. <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/aebcb00c-6699-4fbf-80cc-ae7388f0320/content>
- Hnydiuk-Stefan, A., Królczyk, J., Matuszek, D., Biłos, Ł., Grzywacz, Ż., Bożym, M., Junga, R., & Rai, R. (2023). Accumulation of pollutants from fly ash in *Pleurotus ostreatus* and a substrate based on coffee grounds by elemental analysis using the ICP-OES method and

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

- photometric method. *Environmental Science and Pollution Research International*, 30(37), 88197–88212. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28751-y>
- Idowu, I. A., Hashim, K., Shaw, A., & Nunes, L. J. R. (2023). Energy recovery from brewery spent grains and spent coffee grounds a circular economy approach to waste valorization. *Biofuels*, 14(4), 333–342. <https://doi.org/10.1080/17597269.2022.2135292>
- Iriondo-DeHond, A., Aparicio García, N., Fernandez-Gomez, B., Guisantes-Batan, E., Velázquez Escobar, F., Blanch, G. P., San Andres, M. I., Sanchez-Fortun, S., & del Castillo, M. D. (2019). Validation of coffee by-products as novel food ingredients. *Innovative Food Science & Emerging Technologies IFSET The Official Scientific Journal of the European Federation of Food Science and Technology*, 51, 194–204. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.06.010>
- Iriondo-DeHond, A., García, N. A., Fernandez-Gomez, B., Guisantes-Batan, E., Escobar, F. V., Blanch, G. P., Andres, M. I. S., Sanchez-Fortun, S., & Del Castillo, M. D. (2018). Validation of coffee by-products as novel food ingredients. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 51, 194-204. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.06.010>
- ISAM Academy. (2024, marzo 21). *Agrologística inversa ¿Sigue tu empresa anclada al pasado?* ISAM Education. <https://isam.education/agrologistica-inversa-sigue-tu-empresa-anclada-al-pasado/>
- Jomnonkhaow, U., Plangklang, P., Reungsang, A., Peng, C.-Y., & Chu, C.-Y. (2024). Valorization of spent coffee grounds through integrated bioprocess of fermentable sugars, volatile fatty acids, yeast-based single-cell protein and biofuels production. *Bioresource Technology*, 393(130107), 130107. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130107>

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

- Karmee, S. K., Swanepoel, W., & Marx, S. (2018). Biofuel production from spent coffee grounds via lipase catalysis. *Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects*, 40(3), 294–300. <https://doi.org/10.1080/15567036.2017.1415394>
- Khan, S. A. R., Yu, Z., Golpira, H., Sharif, A., & Mardani, A. (2021). A state-of-the-art review and meta-analysis on sustainable supply chain management Future research directions. *Journal of Cleaner Production*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123357>
- La Scalia, G., Saeli, M., Miglietta, P. P., & Micale, R. (2021). Coffee biowaste valorization within circular economy an evaluation method of spent coffee grounds potentials for mortar production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(9), 1805–1815. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01968-0>
- Lagrasta, F. P., Pontrandolfo, P., & Scozzi, B. (2021). Circular Economy Business Models for the Tanzanian Coffee Sector A Teaching Case Study. *Sustainability*, 13(24), 13931. <https://doi.org/10.3390/su132413931>
- Laili, N., Djatna, T., Indrasti, N.S., Yani, M., 2024. Optimization of industrial symbiosis in coffee-based eco-industrial park design. *Global Journal of Environmental Science and Management* 10, 621–642. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.02.13>.
- Laili, N., Indrasti, N. S., Yani, M., & Djatna, T. (2024). Coffee Waste Management Using Valorization Technology Potential Development of Eco-Industrial Park in Jember Regency, Indonesia. NRCT Data Center. <https://doi.org/10.14456/ea.2024.12>
- Laili, N., Indrasti, N. S., Yani, M., & Djatna, T. (2024). Coffee waste management using valorization technology Potential development of Eco-industrial park in jember regency, Indonesia. <https://doi.org/10.14456/EA.2024.12>

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

- Lee, K.-T., Shih, Y.-T., Rajendran, S., Park, Y.-K., & Chen, W.-H. (2023). Spent coffee ground torrefaction for waste remediation and valorization. *Environmental Pollution (Barking, Essex 1987)*, 324(121330), 121330. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121330>
- Lee, X. J., Ong, H. C., Gao, W., Ok, Y. S., Chen, W.-H., Goh, B. H. H., & Chong, C. T. (2021). Solid biofuel production from spent coffee ground wastes Process optimisation, characterisation and kinetic studies. *Fuel (London, England)*, 292(120309), 120309. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120309>
- Lombardo, L., Campisi, T., & Saeli, M. (2024). Spent coffee grounds-based thermoplastic system to improve heritage building energy efficiency A case study in Madonie Park in Sicily. *Sustainability*, 16(15), 6625. <https://doi.org/10.3390/su16156625>
- Manogaran, M. D., Phua, Y. H., Shamsuddin, M. R., Lim, J. W., & Mansor, N. (2022). Application of organic additives as voltage enhancers for vermicompost-derived bio-battery. *Energy Nexus*, 8(100163), 100163. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100163>
- Matrapazi, V. K., & Zabaniotou, A. (2020). Experimental and feasibility study of spent coffee grounds upscaling via pyrolysis towards proposing an eco-social innovation circular economy solution. *The Science of the Total Environment*, 718(137316), 137316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137316>
- Mayson, S., & Williams, I. D. (2021). Applying a circular economy approach to valorize spent coffee grounds. *Resources, Conservation, and Recycling*, 172(105659), 105659. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105659>
- Mirón-Mérida, V. A., Barragán-Huerta, B. E., & Gutiérrez-Macías, P. (2021). Coffee waste a source of valuable technologies for sustainable development. *En Valorization of Agri-Food Wastes and By-Products* (pp. 173–198). Elsevier.

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

- Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104553, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>.
- Nair, L. G., Agrawal, K., & Verma, P. (2022). An overview of sustainable approaches for bioenergy production from agro-industrial wastes. *Energy Nexus*, 6(100086), 100086. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100086>
- Ninkov, A., Frank, J. R., & Maggio, L. A. (2021). Bibliometrics Methods for studying academic publishing. *Perspectives On Medical Education*, 11(3), 173-176. <https://doi.org/10.1007/s40037-021-00695-4>
- ONU. (2015). Transformar nuestro mundo la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Pacioni, T. R., Soares, D., Domenico, M. D., Rosa, M. F., Moreira, R. de F. P. M., & José, H. J. (2016). Bio-syngas production from agro-industrial biomass residues by steam gasification. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 58, 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.021>
- Papamatthaiakis, N., Barbero-López, A., Eronen, E., Jänis, J., Mola-Yudego, B., & Haapala, A. (2025). Hydrothermal liquefaction of coffee *silverskin* and spent coffee grounds Bioenergy and biochemical potential. *Bioenergy Research*, 18(1). <https://doi.org/10.1007/s12155-025-10867-3>
- Pardo, L. F. (2016). Aplicaciones biológicas del mucílago residual producto del beneficio de café [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio Institucional UIS. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/34821>
- Pongsiriyakul, K., Wongsurakul, P., Kiatkittipong, W., Premashthira, A., Kuldilok, K., Najdanovic-Visak, V., Adhikari, S., Cognet, P., Kida, T., & Assabumrungrat, S. (2024).

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

- Upcycling Coffee Waste Key Industrial Activities for Advancing Circular Economy and Overcoming Commercialization Challenges. *Processes*, 12(12), 2851. <https://doi.org/10.3390/pr12122851>
- Ranjbari, M., Shams Esfandabadi, Z., Quatraro, F., Vatanparast, H., Lam, S. S., Aghbashlo, M., & Tabatabaei, M. (2022). Biomass and organic waste potentials towards implementing circular bioeconomy platforms A systematic bibliometric analysis. *Fuel* (London, England), 318(123585), 123585. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123585>
- Rebollo-Hernanz, M., Aguilera, Y., Gil-Ramírez, A., Benítez, V., Cañas, S., Braojos, C., & Martín-Cabrejas, M. A. (2023). Biorefinery and stepwise strategies for valorizing coffee by-products as bioactive food ingredients and nutraceuticals. *Applied Sciences* (Basel, Switzerland), 13(14), 8326. <https://doi.org/10.3390/app13148326>
- Roa-Mejía, G., Oliveros-Tascón, C. E., Sanz-Urbe, J. R., Álvarez-Gallo, J., Ramírez, C. A., & Álvarez-Hernández, J. R. (1997). Desarrollo de la tecnología BECOLSUB para el beneficio ecológico del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 238, 1-8. [https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/avances\\_técnicos/article/view/1908/5303](https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/avances_técnicos/article/view/1908/5303)
- Roy, P., Mohanty, A. K., Dick, P., & Misra, M. (2023). A review on the challenges and choices for food waste valorization Environmental and economic impacts. *ACS Environmental Au*, 3(2), 58–75. <https://doi.org/10.1021/acsenvironau.2c00050>
- Saeli, M., Capela, M. N., Campisi, T., Paula Seabra, M., Tobaldi, D. M., & La Fata, C. M. (2022). Architectural technologies for life environment Spent coffee ground reuse in lime-based mortars. A preliminary assessment for innovative green thermo-plasters. *Construction and Building Materials*, 319(126079), 126079. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126079>

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

- Sangta, J., Wongkaew, M., Tangpao, T., Rachtanapun, P., Chanway, C. P., & Sommano, S. R. (2024). Application of coffee pulp-derived pectins as a novel coating spray to mitigate *Paramyothecium breviseta*, an etiological agent inducing leaf spot disease in coffee. *Process Safety and Environmental Protection Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B*, 188, 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.06.005>
- Schmidt Rivera, X. C., Gallego-Schmid, A., Najdanovic-Visak, V., & Azapagic, A. (2020). Life cycle environmental sustainability of valorisation routes for spent coffee grounds From waste to resources. *Resources, Conservation, and Recycling*, 157(104751), 104751. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104751>
- Sousa, S., Duarte, E., Mesquita, M., & Saraiva, S. (2021). Energetic valorization of cereal and exhausted coffee wastes through anaerobic co-digestión with pig slurry. *Frontiers in sustainable food systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.642244>
- Stapel, N., Lupu, R., Kötting, N., Heller, M., Sorribas, V., Boulay, H., Duarte, A. J., Malheiro, B., Ribeiro, C., Justo, J., Silva, M. F., Ferreira, P., & Guedes, P. (2025). Growing mushrooms on coffee grounds - an EPS@ISEP 2024 project. *En Lecture Notes in Educational Technology* (pp. 1197–1206). Springer Nature Singapore.
- Stufano, P., Perrotta, A., Labarile, R., & Trotta, M. (2022). The second life of coffee can be even more energizing *Circularity of materials for bio-based electrochemical energy storage devices*. *MRS Energy & Sustainability*, 9(2), 443–460. <https://doi.org/10.1557/s43581-022-00036-w>
- Stylianou, M., Agapiou, A., Omirou, M., Vyrides, I., Ioannides, I. M., Maratheftis, G., & Fasoula, D. (2018). Converting environmental risks to benefits by using spent coffee grounds (SCG)

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

- as a valuable resource. *Environmental Science and Pollution Research International*, 25(36), 35776–35790. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2359-6>
- Sülar, V., Aksoy, S., İtani, B., & Kara, S. (2025). Production and performance of textile-based surfaces containing tea and coffee wastes. *Journal of Cleaner Production*, 506(145496), 145496. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145496>
- the United Nations Global Compact. (2010). *Supply Chain Sustainability A Practical Guide for Continuous improvement*. [https://www.bsr.org/reports/BSR\\_UNGC\\_SupplyChainReport.pdf](https://www.bsr.org/reports/BSR_UNGC_SupplyChainReport.pdf)
- Tran, T. N., Chen, S.-C., Doan, C. T., & Wang, S.-L. (2025). Unlocking the potential of pomelo albedo A novel substrate for alpha-amylase production using *Bacillus licheniformis*. *Fermentation*, 11(6), 336. <https://doi.org/10.3390/fermentation11060336>
- Tsigkou, K., Demissie, B. A., Hashim, S., Ghofrani-Isfahani, P., Thomas, R., Mapinga, K. F., Kassahun, S. K., & Angelidaki, I. (2025). Coffee processing waste Unlocking opportunities for sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 210(115263), 115263. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115263>
- Ulsido, M. D., Dinigu, F. B., & Berego, Y. S. (2025). Uncovering the effect of multiple wet coffee processing industries' effluents on river water quality parameters. *Environmental Forensics*, 26(4), 563–575. <https://doi.org/10.1080/15275922.2025.2490477>
- Vakalis, S., Moustakas, K., Benedetti, V., Cordioli, E., Patuzzi, F., Loizidou, M., & Baratieri, M. (2019). The “COFFEE BIN” concept centralized collection and torrefaction of spent coffee grounds. *Environmental Science and Pollution Research International*, 26(35), 35473–35481. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04919-3>

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

- Valencia-Aristizábal, G. (1972). Utilización de la pulpa de café en los almácigos. *Avances Técnicos Cenicafé*, 17, 1-2.  
[https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/avances\\_técnicos/article/view/2162/5554](https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/avances_técnicos/article/view/2162/5554)
- Vitale, E., Motta, C. M., Avallone, B., Amoresano, A., Fontanarosa, C., Battaglia, G., Spinelli, M., Fogliano, C., Paradiso, R., & Arena, C. (2024). Sustainable reuse of espresso coffee by-products as a natural fertilizer to improve growth and photosynthesis in cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants. *Waste and Biomass Valorization*, 15(2), 543–559.  
<https://doi.org/10.1007/s12649-023-02143-2>
- Wang, Y., Tian, Q., Yang, G., Li, X., Du, W., Leong, Y. K., & Chang, J.-S. (2022). Enhanced chlortetracycline removal by iron oxide modified spent coffee grounds *biochar* and persulfate system. *Chemosphere*, 301(134654), 134654.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134654>
- Yeoh, L., & Ng, K. S. (2022). Future prospects of spent coffee ground valorisation using a biorefinery approach. *Resources, Conservation, and Recycling*, 179(106123), 106123.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106123>
- Zambrano Franco, D., Rodriguez-Valencia, N., Lopez Posada, U., Orozco, P. A., & Zambrano Giraldo, A. (2006). Tratamiento anaerobio de las aguas mieles del café. *Boletín Técnico Cenicafé*, 29, 1–28.  
<https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/bot/article/view/1314/1489>
- Zapata, W. A. M., Pereira, C. A. C., & Espitia, D. A. L. (2022). Estudio de la logística inversa y su importancia en la gestión empresarial de organizaciones sostenibles1. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/revista-estrategica->

## LOGISICA INVERSA EN LA PRODUCCION DE CAFÉ

organizacio/article/download/5657/5402#~text=Las%20tendencias%20tem%C3%A1tica  
s%20en%20log%C3%ADstica,del%20pa%C3%ADs%20y%20la%20regi%C3%B3n.

Zohourfazeli, H., Sabaghpourfard, A., Chaabane, A., & Jabbarzadeh, A. (2025). Optimization-based model of a circular supply chain for coffee waste. *Supply Chain Analytics*, 10(100126), 100126. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2025.100126>

Zuluaga, R., Hoyos, C. G., Velásquez-Cock, J., Vélez-Acosta, L., Palacio Valencia, I., Rodríguez Torres, J. A., & Gañán Rojo, P. (2024). Exploring spent coffee grounds Comprehensive morphological analysis and chemical characterization for potential uses. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 29(24). <https://doi.org/10.3390/molecules29245866>