

**Propuesta de un modelo de economía circular para el sector cafetero que permita el aprovechamiento eficiente de subproductos residuales en el distrito El Carmen de Oporapa del departamento del Huila, Colombia**

Alexis Andrey Ramírez Gaitán

Asesor

Víctor Fabian Forero Ausique

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

Maestría en Agronegocios

2026

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a las comunidades cafeteras del distrito El Carmen, Oporapa (Huila), quienes con su esfuerzo, sabiduría y amor por la tierra inspiran el desarrollo sostenible del territorio.

También dedicamos este proyecto a todos aquellos que creen en la transformación rural a través del conocimiento, la innovación y la cooperación, pilares fundamentales para construir un modelo de economía circular que fortalezca el bienestar social y ambiental de nuestra región.

## **Agradecimientos**

Expreso mi más sincero agradecimiento a las comunidades cafeteras del distrito El Carmen por su valiosa colaboración, disposición y compromiso durante el desarrollo de las actividades de investigación y extensión,

Al director de trabajo de grado Víctor Fabian Forero, a Jurados de trabajo de grado, Carlos William Mera, Diego Alejandro Benavidez que apoyaron este proyecto tan importante para el desarrollo de las familias Caficultoras en zona rural del municipio de Oporapa del departamento del Huila.

A Dany Zuleima Sánchez por su apoyo en el proceso de formulación del proyecto.

Agradezco de manera especial a los productores, asociaciones locales, líderes veredales y familias caficultoras, quienes compartieron sus conocimientos, experiencias y saberes tradicionales sobre el manejo de los subproductos del café. Su participación permitió comprender de manera integral las dinámicas productivas del territorio y construir conjuntamente propuestas sostenibles para fortalecer la economía circular en el sector.

Reconocemos igualmente el apoyo institucional de las entidades locales, educativas y comunitarias que facilitaron los espacios de encuentro, la recolección de información y el desarrollo de las prácticas en campo. Su acompañamiento fue fundamental para el cumplimiento de los objetivos planteados y para consolidar un proceso participativo, basado en el respeto, la cooperación y la sostenibilidad ambiental.

**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

**Pitalito, febrero del 2026**

## Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo proponer un modelo de economía circular para el aprovechamiento de los subproductos generados en el beneficio del café en el distrito El Carmen, municipio de Oporapa (Huila), con el fin de mejorar la sostenibilidad económica, ambiental y social de las fincas cafeteras. El estudio partió del diagnóstico de la generación y manejo de residuos, especialmente pulpa y aguas mieles, así como de la identificación de tecnologías apropiadas para su transformación, entre ellas el compostaje y los filtros verdes. La metodología se desarrolló bajo un enfoque mixto, mediante el análisis de información secundaria, la estimación del potencial de aprovechamiento de residuos, la evaluación financiera de alternativas de fertilización y la aplicación de un grupo focal con actores del sector cafetero para identificar barreras y mecanismos de implementación. La viabilidad económica del modelo se analizó a través de indicadores como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la relación costo-beneficio. Los resultados evidenciaron que la fertilización orgánico-mineral es la alternativa más eficiente, al presentar el menor costo por hectárea y una rentabilidad positiva en el mediano plazo comparado con la fertilización convencional. Asimismo, el modelo permite el aprovechamiento del 100 % de la pulpa generada y el tratamiento de las aguas residuales, reduciendo la contaminación del suelo y las fuentes hídricas.

***Palabras clave:*** Economía Circular, Caficultura, Compostaje, Pulpa De Café, Sostenibilidad.

## Abstract

This research aimed to propose a circular economy model for utilizing coffee byproducts generated during coffee processing in the El Carmen district of the municipality of Oporapa (Huila), with the goal of improving the economic, environmental, and social sustainability of coffee farms. The study began with a diagnosis of waste generation and management, particularly pulp and coffee wastewater, as well as the identification of appropriate technologies for their transformation, including composting and green filters. The methodology employed a mixed-methods approach, utilizing secondary data analysis, estimation of waste utilization potential, financial evaluation of fertilization alternatives, and a focus group with stakeholders in the coffee sector to identify barriers and implementation mechanisms. The economic viability of the model was analyzed using indicators such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and cost-benefit analysis. The results showed that organic-mineral fertilization is the most efficient alternative, presenting the lowest cost per hectare and positive profitability in the medium term compared to conventional fertilization. Furthermore, the model allows for the use of 100% of the generated pulp and the treatment of wastewater, reducing soil and water source pollution.

**Keywords:** Circular Economy, Coffee Farming, Composting, Coffee Pulp, Sustainability.

## Tabla de Contenido

Introducción.....	17
Planteamiento del Problema.....	20
Pregunta de Investigación.....	23
Justificación.....	24
Objetivos.....	27
Objetivo General.....	27
Objetivos Específicos.....	27
Marco Teórico.....	28
Economía Circular.....	28
Subproductos del Café: Composición Química y Potencial de Aprovechamiento Sostenible.....	33
Tecnologías en el Tratamiento de Aguas Residuales.....	37
Sistemas Anaerobios.....	38
Lagunas de Oxidación.....	38
Humedales Artificiales.....	38
Sistemas Sépticos y Tratamiento Doméstico en Fincas Cafeteras.....	39
Campos de Infiltración.....	40
Filtros Verdes.....	40
Sostenibilidad del Café.....	40
Marco Conceptual.....	43

Agronegocio y Cadena de Valor del Café.....	43
Asociatividad y Desarrollo Rural Sostenible.....	43
Economía Circular y Valorización de Residuos.....	44
Subproductos del Café y Generación de Valor Agregado.....	45
Innovación Tecnológica Rural.....	45
Antecedentes.....	47
Referencias Internacionales.....	47
Referencias Nacionales.....	50
Marco Contextual.....	55
Metodología.....	57
Tipo de Estudio.....	57
Diseño Metodológico.....	57
Población y Muestra.....	58
Técnica de Muestreo.....	58
Tamaño de Muestra.....	58
Fórmula Para Población Finita.....	58
VARIABLES E INDICADORES.....	60
Variable 1. Manejo de Subproductos del Café.....	60
Indicadores.....	60
Variable 2. Viabilidad Económica del modelo.....	60

	8
Indicadores.....	60
Variable 3. Impacto Social.....	60
Indicadores.....	61
Variable 4. Impacto Ambiental.....	62
Indicadores.....	62
Procedimiento.....	63
Paso 1. Identificación y Caracterización de los Subproductos del Beneficio del Café.....	64
Paso 2. Análisis de Tecnologías y Procesos para la Transformación de Subproductos.....	64
Paso 3. Diseño del Modelo de Economía Circular y Formulación del Plan de Implementación.....	65
Paso 4. Evaluación del Impacto Económico, Social y Ambiental del Modelo.....	65
Paso 5. Identificación de Mecanismos para la Implementación del Modelo.....	67
Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información.....	67
Entrevista Semiestructurada.....	67
Revisión Documental (Artículos Científicos, FNC, Cenicafé).....	68
Grupo Focal – Entrevista Focal.....	68
Validación de Instrumentos.....	69
Consideraciones Éticas.....	69
Resultados.....	71

Identificar y Caracterizar los Principales Subproductos Residuales Generados en los Agronegocios de Café en El Carmen.....	71
Tamaño del Cultivo.....	71
Tipo de Organización.....	75
Subproductos Generados.....	77
Manejo Actual de los Residuos.....	78
Conocimiento y Aplicación de Tecnologías.....	80
Costos Anuales de Manejo de Residuos.....	82
Disposición para Implementar un Modelo de Economía Circular.....	84
Percepción Sobre la Importancia del Aprovechamiento de Residuos.....	89
Percepción Sobre el Impacto del Modelo en la Comunidad.....	91
Explorar Tecnologías y Procesos Para la Transformación de Estos Residuos en Productos Reutilizables, Tales Como Abonos Orgánicos, Biocombustibles, Compost, Entre Otros.....	96
Despulpado en Seco y Manejo de Pulpa sin Agua.....	96
Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio (SMTA).....	97
Modelo Integral de Aprovechamiento de Subproductos del Café.....	98
Aprovechamiento del Cisco de Café y Residuos Lignocelulósicos.....	98
Tecnología Becolsub.....	99
Tecnología Ecomil.....	100
Filtros Verdes.....	101

Referentes Nacionales e Internacionales en el Aprovechamiento de Subproductos del Café	102
Consideraciones Prácticas Según el Tamaño del Productor	103
Consideraciones Para la Adaptación al Contexto Local	104
Proponer un Plan de Implementación para la Adopción de un Modelo de Economía Circular por los Caficultores de la Región, Considerando Sus Capacidades Técnicas y Recursos Disponibles, Aportando a los Objetivo de Desarrollo Sostenibles (ODS)	106
Diseño del Modelo de Economía Circular	106
Formulación del Plan de Implementación	109
Roles y Responsabilidades de los Actores	122
Articulación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	124
Analizar el Impacto Económico, Social y Ambiental del Modelo Propuesto	125
Impacto Económico	125
Impacto Social	135
Impacto Ambiental	137
Efectos Secundarios	140
Identificar Estrategias Para la Implementación del Modelo de Economía Circular	141
Discusión	148
Conclusiones	152
Componente Ambiental	152

	11
Componente Económico.....	153
Componente Territorial.....	154
Recomendaciones.....	156
Referencias Bibliográficas.....	157
Apéndices.....	164

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Ubicación Geográfica de Oporapa, Huila</i> .....	21
<b>Figura 2</b> <i>Subproductos del Café y sus Aplicaciones</i> .....	34
<b>Figura 3</b> <i>Subproductos del Café y sus Compuestos Químicos</i> .....	36
<b>Figura 4</b> <i>Ubicación Distrito EL Carmen de Oporapa Huila, Colombia</i> .....	56
<b>Figura 5</b> <i>Cronología del Sistema Metodológico</i> .....	57
<b>Figura 6</b> <i>Resumen de Numero de Productores por Vereda</i> .....	73
<b>Figura 7</b> <i>Porcentaje de Participación Promedio de Área de Producción</i> .....	74
<b>Figura 8</b> <i>Porcentaje de Participación de Tipo de Organización</i> .....	76
<b>Figura 9</b> <i>Porcentajes de Residuos de Cosecha de Café Generados en el Distrito el Carmen</i> .....	78
<b>Figura 10</b> <i>Principales Usos de los Residuos del Café</i> .....	80
<b>Figura 11</b> <i>Porcentaje de Conocimiento Sobre Técnicas para Procesar los Residuos del Café</i> .....	82
<b>Figura 12</b> <i>Porcentaje de Costos Anuales del Manejo de Residuos</i> .....	83
<b>Figura 13</b> <i>Porcentaje de Disposición Para Implementar un Modelo de Economía Circular</i> .....	85
<b>Figura 14</b> <i>Apoyos Necesarios para Implementar un Modelo de Economía Circular</i> .....	87
<b>Figura 15</b> <i>Percepción Sobre Aprovechar los Residuos del Agronegocio del Café</i> .....	89
<b>Figura 16</b> <i>Percepción Sobre un Modelo de Economía Circular</i> .....	91
<b>Figura 17</b> <i>Ciclo de Economía Circular Propuesto y Sistema de Producción Para Distrito El Carmen Oporapa, Huila</i> .....	103
<b>Figura 18</b> <i>Ilustración de Fosa de Compost</i> .....	108
<b>Figura 19</b> <i>Ilustración de Implementación Filtros Verdes</i> .....	118
<b>Figura 20</b> <i>Residuos de Cosechas Cafeteras en Oporapa y Distrito El Carmen</i> .....	127
<b>Figura 21</b> <i>Avance Técnico 549 Fertilización Organomineral</i> .....	128

<b>Figura 22</b> <i>Aportes de Nutrientes con Diferentes Opciones de Fertilizantes</i> .....	129
--	-----

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Datos del Cálculo de la Muestra</i> .....	59
<b>Tabla 2</b> <i>Resumen de Muestreo de Distrito El Carmen por Vereda, 8 Localidades</i> .....	72
<b>Tabla 3</b> <i>Porcentaje de Participación del Tamaño del Cultivo (Ha)</i> .....	74
<b>Tabla 4</b> <i>Información General de los Productores Encuestados</i> .....	75
<b>Tabla 5</b> <i>Tipos de Subproductos Generados</i> .....	77
<b>Tabla 6</b> <i>Manejo Actual de los Residuos</i> .....	79
<b>Tabla 7</b> <i>Conocimiento y Aplicación de Tecnologías</i> .....	81
<b>Tabla 8</b> <i>Costos Anuales de Manejo de Residuos</i> .....	82
<b>Tabla 9</b> <i>Disposición para Implementar un Modelo de Economía Circular</i> .....	84
<b>Tabla 10</b> <i>Apoyos Necesarios Para Implementar un Modelo de Economía Circular</i> .....	86
<b>Tabla 11</b> <i>Percepción Sobre la Importancia del Aprovechamiento de Residuos</i> .....	88
<b>Tabla 12</b> <i>Percepción Sobre el Impacto del Modelo en la Comunidad</i> .....	90
<b>Tabla 13</b> <i>Matriz Consolidada de Resultados de Entrevista a Caficultores – Distrito El Carmen, Oporapa (Huila)</i> .....	92
<b>Tabla 14</b> <i>Actividades y Cronograma de Implementación por Etapas</i> .....	111
<b>Tabla 15</b> <i>Estructura Costos Para Instalación de Compostera</i> .....	112
<b>Tabla 16</b> <i>Herramientas Para Construcción de Compostera</i> .....	113
<b>Tabla 17</b> <i>Costos Operativos Anuales de compostera</i> .....	114
<b>Tabla 18</b> <i>Estructura costos (Insumos/Operación), para Instalación de Filtro Verde</i> .....	118
<b>Tabla 19</b> <i>Actividades de Mantenimiento tecnología Filtros Verdes</i> .....	122
<b>Tabla 20</b> <i>Residuos de Cosechas Cafeteras Aproximadas en Oporapa</i> .....	126
<b>Tabla 21</b> <i>Tabla Comparativa Costos Fertilización 2026</i> .....	130

<b>Tabla 22</b> <i>Flujo de Caja para Fertilización Orgánico-Mineral</i> .....	133
<b>Tabla 23</b> <i>Hallazgos Grupo Focal</i> .....	142

**Lista de Apéndices**

<b>Apéndice A</b> <i>Autor Proyecto en Unidad Productiva de Café, El Carmen de Oporapa</i> .....	164
<b>Apéndice B</b> <i>Evidencia de Disposición Actual de Pulpa de Café, El Carmen Oporapa</i> .....	165
<b>Apéndice C</b> <i>Grupo de Caficultoras, Asociativo Aroma de Mujer</i> .....	166
<b>Apéndice D</b> <i>Caficultores del Distrito El Carmen</i> .....	167
<b>Apéndice E</b> <i>Formato Entrevista Semiestructurada</i> .....	168
<b>Apéndice F</b> <i>Formato de Entrevista Grupo Focal</i> .....	173

## Introducción

La caficultura constituye una de las principales actividades económicas y sociales del departamento del Huila y del municipio de Oporapa, donde representa la base productiva de un alto número de familias rurales. Este liderazgo productivo se evidencia en que el Huila ocupa el primer lugar en área sembrada en café en Colombia con 147 mil hectáreas y cuenta con más de 101.000 fincas cafeteras y 83.780 caficultores, dentro de los cuales municipios como Oporapa hacen parte de una oferta significativa de área cosechada (Tique, A 2020).

No obstante, el proceso tradicional de beneficio húmedo del café genera grandes volúmenes de subproductos sólidos y líquidos, como la pulpa y las aguas mieles, cuya disposición inadecuada ocasiona impactos ambientales significativos, especialmente en la contaminación del suelo y de las fuentes hídricas, así como la pérdida de materiales con potencial de aprovechamiento agronómico. (Pérez-Osorio, G., Avelino-Flores, F., Hernández-Lorenzo, B., Gutiérrez-Arias, J.E.M., Mendoza-Hernández, J.C., Chavarin-Pineda, Y. 2025).

En este contexto, la economía circular surge como un enfoque estratégico para transformar los sistemas productivos lineales en modelos cíclicos, en los que los residuos se convierten en insumos que retornan al proceso productivo, optimizando el uso de los recursos y reduciendo los impactos ambientales (Kirchherr, J., Nadja 2023). En el sector cafetero, este enfoque permite el aprovechamiento de los subproductos del beneficio mediante tecnologías apropiadas y de bajo costo, adaptadas a las condiciones de los pequeños y medianos productores.

El departamento del Huila presenta brechas en los procesos de transferencia de conocimiento, adopción tecnológica e innovación que afectan principalmente a los pequeños productores, debido a la limitada infraestructura tecnológica, la baja alfabetización digital y la

escasa inversión en investigación y desarrollo, factores que restringen el uso de herramientas orientadas a mejorar la competitividad del sector agrícola.

Esta situación se refleja a escala local en el distrito El Carmen, del municipio de Oporapa, donde la caficultura se desarrolla en unidades productivas de pequeña escala con dificultades para acceder a tecnologías para el manejo de residuos y con altos costos asociados a la fertilización química, lo que limita la modernización de los sistemas productivos y el mejoramiento de las condiciones económicas de las familias cafeteras. En este contexto, se evidencia la necesidad de proponer alternativas sostenibles que permitan mejorar la rentabilidad del cultivo, reducir la contaminación ambiental y fortalecer las capacidades técnicas de los caficultores (Salamanca, F 2024).

A partir de esta problemática, la presente investigación tuvo como objetivo proponer un modelo de economía circular para el aprovechamiento de los subproductos del beneficio del café, mediante la implementación de procesos de compostaje de pulpa y el tratamiento de aguas mieles con filtros verdes, evaluando su viabilidad técnica, económica, ambiental y social. Asimismo, se analizaron los mecanismos institucionales necesarios para su implementación en el territorio.

El desarrollo del estudio se estructuró en varias etapas que incluyeron el diagnóstico del sistema productivo, la selección de tecnologías apropiadas, la formulación del plan de implementación, la evaluación financiera del modelo y el análisis de los impactos generados. De igual manera, se incorporó la participación de actores locales mediante un grupo focal, con el fin de identificar las barreras y oportunidades para la adopción del modelo.

Con este trabajo se busca aportar una alternativa sostenible para la caficultura del distrito El Carmen, que permita cerrar ciclos, reducir la dependencia de insumos externos, disminuir los impactos ambientales del beneficio húmedo del café y contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en el sector rural.

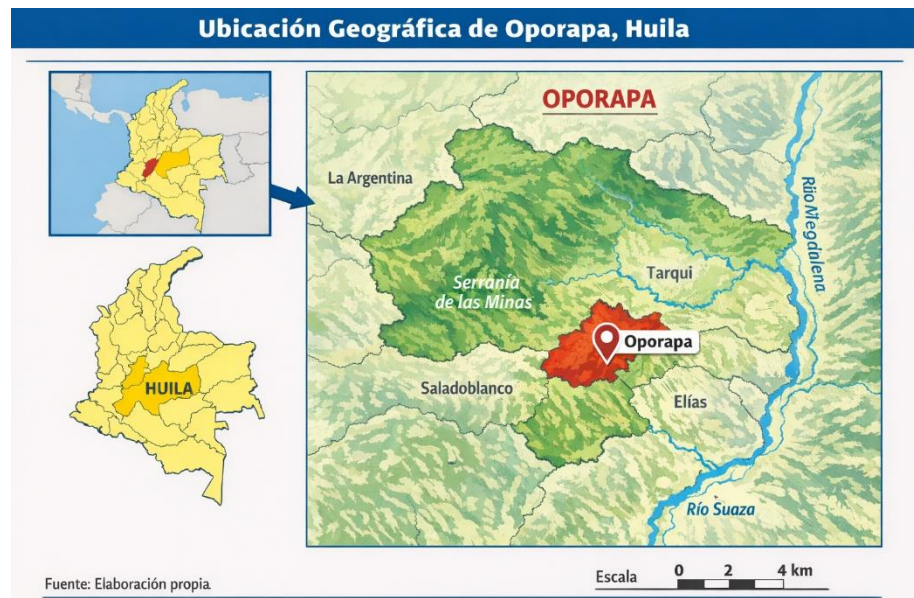
### **Planteamiento del Problema**

La caficultura constituye una de las principales actividades económicas del departamento del Huila, desarrollada en 35 municipios por más de 84.000 familias que cultivan aproximadamente 147.991 hectáreas de café arábigo de variedades como Castillo, Colombia, Caturra, Típica, Borbón y Tabí (Federación Nacional de Cafeteros, 2023). Esta actividad no solo representa un pilar fundamental para la economía regional, sino también un componente esencial en la generación de empleo rural y el sostenimiento de los medios de vida campesinos.

En este contexto, el municipio de Oporapa, como se puede ver en la figura 1 cuenta con una extensión territorial de 150 km<sup>2</sup> y una población de 12.701 habitantes, de los cuales cerca de 10.304 habitantes (81,1%), reside en la zona rural, se destaca por su fuerte vocación cafetera ya que tiene una producción de 2.468,58 toneladas de café pergamino seco CPS al año. En este territorio se registran aproximadamente 2.226 productores, 2.929 fincas cafeteras y una extensión de 3.045 hectáreas cultivadas en café (TerriData, 2024). De esta manera Oporapa produce cerca de 12.071 toneladas de café cereza y, 4.828,4 toneladas de pulpa por año.

## Figura 1

### *Ubicación Geográfica de Oporapa, Huila*



*Nota.* El mapa muestra la ubicación geográfica del municipio de Oporapa en el departamento del Huila, Colombia, así como sus municipios vecinos y principales referentes geográficos. *Fuente.* Elaboración Propia a partir de fuentes digitales (2026)

Particularmente, en el distrito El Carmen, que concentra aproximadamente 743 caficultores con un promedio de 1,9 hectáreas por productor, esto representa cerca de 1.411 hectáreas cultivadas en café, que cuenta con una producción estimada de 1.143,9 toneladas CPS, una producción de 5.593,7 toneladas de café cereza, que generarían aproximadamente 2.23,5 toneladas de pulpa (Cenicafé, 2021; Ramírez, G 2025).

Teniendo en cuenta lo anterior es posible mencionar que esta gran cantidad de residuos sólidos, cuando no se gestionan adecuadamente, contribuye a la contaminación del suelo, la proliferación de microorganismos y la degradación de los ecosistemas locales.

Por su parte, frente al consumo de agua durante el beneficio convencional del café el municipio de Oporapa, puede requerir aproximadamente 98.720.000 litros de agua, equivalentes a 98.720 m<sup>3</sup>. Siendo para el distrito El Carmen un uso de 45.756.000 litros, equivalentes a 45.756 m<sup>3</sup>, y gran parte del recurso que termina siendo vertido sin tratamiento adecuado (Cenicafé, 2021; Ramírez, G 2025). Estas aguas residuales contienen altas concentraciones de materia orgánica, azúcares, cafeína, polifenoles y taninos, lo que genera una elevada demanda biológica de oxígeno y representa un riesgo significativo para las fuentes hídricas y la biodiversidad acuática (Mendes dos Santos, É., et al., 2021).

Además del impacto ambiental, el manejo ineficiente de los subproductos del café implica una pérdida de oportunidades económicas para los caficultores, quienes podrían aprovechar estos residuos mediante procesos de transformación en abonos orgánicos, biocombustibles, compostajes u otros productos de valor agregado (Fernández-Cortés, Y, Sotto-Rodríguez, K & Vargas-Marín, L 2020).

Sin embargo, tras visitas a las unidades productivas del Distrito El Carmen como profesional en asistencia técnica, se evidenció mediante observación directa, junto con el relato de los mismo caficultores y a través de la entrevista realizada en campo, limitaciones relacionadas con la falta de capacitación técnica, escasa infraestructura para el tratamiento de residuos y baja adopción de tecnologías sostenibles, lo que dificulta la implementación de estrategias de economía circular en los agronegocios cafeteros.

Esta situación no solo afecta la sostenibilidad ambiental del territorio, sino que también limita la competitividad del sector caficultor frente a mercados que exigen cada vez mayores estándares de producción sostenible y cumplimiento normativo en materia ambiental. En este

sentido, se identifica la necesidad de diseñar un modelo de economía circular que permita optimizar el aprovechamiento de los subproductos residuales de la caficultura en el distrito El Carmen, contribuyendo a la reducción de impactos ambientales, al fortalecimiento de la sostenibilidad productiva y a la generación de valor agregado en los agronegocios cafeteros.

En este contexto, surgió la necesidad de indagar cuáles son los principales subproductos residuales generados en la caficultura local y cómo se manejan actualmente, así como identificar las tecnologías y alternativas existentes para su aprovechamiento sostenible. De igual manera, se hizo necesario analizar qué modelo de economía circular se ajusta a las condiciones productivas y capacidades de los caficultores de la región, y evaluar los impactos económicos, sociales y ambientales que se derivarían de la implementación de un modelo alternativo frente al manejo tradicional de estos residuos.

### **Pregunta de Investigación**

¿Qué estrategias permiten estructurar un modelo de economía circular para el aprovechamiento sostenible (ambiental, económico y social) de los subproductos residuales generados en los agronegocios cafeteros del distrito El Carmen, municipio de Oporapa, Huila?

## Justificación

El sector cafetero constituye uno de los pilares fundamentales de la economía rural en Colombia y, particularmente, en el departamento del Huila, donde el cultivo del café representa la principal fuente de ingresos para numerosas familias campesinas (Federación Nacional de Cafeteros, 2023). En el distrito El Carmen del municipio de Oporapa, la caficultura no solo sustenta la economía local, sino que configura la identidad productiva y social del territorio. Sin embargo, el modelo productivo predominante continúa centrado principalmente en la comercialización de café pergamino seco, lo que limita la generación de valor agregado, restringe la diversificación de ingresos y reduce la competitividad de los sistemas productivos locales frente a mercados que demandan sostenibilidad, innovación y diferenciación.

El proceso de beneficio del café genera una significativa cantidad de subproductos orgánicos, tales como pulpa, mucílago, cascarilla, borra y otros, los cuales, cuando no son gestionados adecuadamente, se convierten en fuentes de contaminación del suelo, agua y aire (Mendes dos Santos, É., et al., 2021). No obstante, más allá del impacto ambiental, estos subproductos representan una oportunidad estratégica para fortalecer los agronegocios cafeteros mediante su transformación en nuevos bienes o insumos con valor agregado, favoreciendo la eficiencia productiva, la reducción de costos y la creación de nuevas líneas de negocio en el ámbito rural.

En este contexto, la implementación de modelos de economía circular en los agronegocios cafeteros emerge como una alternativa estratégica para transformar estos residuos en activos productivos, contribuyendo simultáneamente a la sostenibilidad ambiental y a la rentabilidad de las fincas cafeteras (Rodríguez, J., 2021). La valorización de subproductos puede

impulsar procesos de innovación rural, fomentar emprendimientos asociados a la cadena del café y fortalecer los encadenamientos productivos locales, integrando actores como productores, asociaciones, cooperativas, entidades territoriales e instituciones de investigación. Esta articulación favorece la transferencia de conocimiento, la incorporación de tecnología y la consolidación de alianzas estratégicas que incrementen la competitividad del sector.

Desde la perspectiva ambiental, la adecuada gestión de los residuos del beneficio del café puede reducir significativamente los impactos negativos sobre los ecosistemas locales, especialmente la contaminación de fuentes hídricas y la emisión de gases derivados de la descomposición orgánica. Sin embargo, desde el enfoque económico y de agronegocios, su aprovechamiento representa una oportunidad para diversificar la oferta productiva, mejorar la rentabilidad, disminuir la dependencia de un solo producto y fortalecer la resiliencia económica de las unidades productivas cafeteras (Rodríguez, J., 2021).

Esta investigación se justifica también por su contribución al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas, especialmente el ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico), el ODS 9 (industria, innovación e infraestructura), el ODS 12 (producción y consumo responsables), el ODS 13 (acción por el clima) y el ODS 17 (alianzas para lograr los objetivos), al promover modelos productivos sostenibles, innovación en el sector rural y articulación de actores para la generación de valor agregado (ONU, 2025).

Asimismo, la propuesta se alinea con la Estrategia Nacional de Economía Circular, que promueve la reincorporación de residuos en ciclos productivos para aumentar la productividad y competitividad del país, así como con el CONPES 3934 de 2018 (Política de Crecimiento Verde)

y el CONPES 4011 de 2020, los cuales establecen lineamientos para el uso eficiente de recursos, la innovación empresarial y el fortalecimiento de cadenas productivas sostenibles en Colombia (Departamento Nacional de Planeación. 2018).

De igual manera, se articula con las prioridades establecidas en el Plan de Desarrollo Municipal de Oporapa 2024–2027, “Oporapa, Una Vía Para la Oportunidad” (Consejo Municipal de Oporapa, 2024), que reconoce la caficultura como eje económico del territorio y plantea la necesidad de promover prácticas productivas sostenibles, procesos de transformación y alternativas de valor agregado.

Desde el ámbito académico, la investigación aporta al desarrollo de modelos de agronegocios sostenibles basados en principios de economía circular, integrando dimensiones técnicas, económicas, sociales y ambientales. En este sentido, el perfil del Magíster en Agronegocios resulta fundamental para el diseño de estrategias innovadoras orientadas a optimizar el aprovechamiento de subproductos, fortalecer los encadenamientos productivos y mejorar la competitividad del sector cafetero regional.

En consecuencia, esta investigación responde a una problemática real del territorio, no solo en términos ambientales, sino también en relación con la necesidad de incrementar la competitividad, promover la innovación rural, generar valor agregado y consolidar alianzas estratégicas dentro de la cadena productiva del café, contribuyendo al desarrollo sostenible y al fortalecimiento económico de los sistemas cafeteros en el sur del Huila.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Proponer un modelo de economía circular que permita el aprovechamiento eficiente de subproductos residuales del agronegocio de café, transformándolos en productos de valor agregado para generar beneficios económicos, en el distrito El Carmen de Oporapa del departamento del Huila, Colombia.

### **Objetivos Específicos**

Identificar y caracterizar los principales subproductos residuales generados en los agronegocios de café en El Carmen.

Explorar tecnologías y procesos para el aprovechamiento integral de los subproductos residuales, mediante estrategias de reutilización, reciclaje y valorización en el marco de la economía circular.

Proponer un plan de implementación para la adopción de un modelo de economía circular por los caficultores de la región, considerando sus capacidades técnicas y recursos disponibles, que aporten a los Objetivo de desarrollo sostenibles (ODS).

Analizar el impacto económico, social y ambiental del modelo propuesto

Identificar estrategias para la implementación del modelo de economía circular propuesto.

## Marco Teórico

### Economía Circular

La economía circular se ha consolidado como un modelo alternativo al sistema económico lineal tradicional, basado en la lógica de extraer, producir, desechar”. Este enfoque propone el cierre de ciclos de materiales y energía mediante estrategias como la reducción, reutilización, reciclaje y valorización de residuos, con el fin de minimizar los impactos ambientales y maximizar el valor de los recursos a lo largo del tiempo (Espinoza, H., A. 2023).

De acuerdo con Ellen MacArthur Foundation, la economía circular se fundamenta en tres principios: la eliminación de residuos y contaminación desde el diseño, la circulación de productos y materiales en su mayor valor posible, y la regeneración de los sistemas naturales (Vilardo., U, 2024). Este enfoque ha sido ampliamente adoptado en diferentes sectores productivos como una estrategia para avanzar hacia el desarrollo sostenible.

Aunque el concepto de economía circular (EC) se ha consolidado en las últimas décadas, sus fundamentos se originan en diversas corrientes de pensamiento desarrolladas desde la década de 1970. En este sentido, disciplinas como la economía ambiental y la ecología industrial han sido determinantes en su evolución, particularmente en lo relacionado con la gestión de residuos, la valorización de materiales y el control de la contaminación (Frosch, 1992; Erkman, 1997; Andersen, 2006; Jacobsen, 2006).

La ecología industrial propone una transformación en los sistemas productivos, pasando de esquemas lineales a modelos de ciclos cerrados, en los cuales los residuos dejan de considerarse desechos para integrarse nuevamente como insumos dentro de los procesos

industriales. Este enfoque busca optimizar el uso de recursos y reducir prácticas ineficientes en la producción (Frosch, 1992).

A partir de estos principios, Walter R. Stahel desarrolló el concepto de economía del rendimiento, planteando un sistema basado en ciclos cerrados y en la prolongación de la vida útil de los productos, sentando las bases de lo que posteriormente se denominaría economía circular (Espinoza, H., A. 2023).

El término economía circular fue formalizado por los economistas David W. Pearce y R. Kerry Turner en su obra “Economics of Natural Resources and the Environment”, donde se plantea que los sistemas económicos deben imitar el funcionamiento de la naturaleza, en el cual los residuos de un proceso se convierten en insumos para otro (Vasileios et al., 2017).

En las últimas décadas, el desarrollo de la economía circular se ha fortalecido con la incorporación de nuevos enfoques como la biomímesis, la economía azul, el modelo “de la cuna a la cuna” y la economía del “donut”. Este último fue propuesto por Kate Raworth, quien plantea un equilibrio entre los límites ecológicos del planeta y las necesidades sociales (Espinoza, H., A. 2023).

El enfoque de biomímesis, impulsado por Janine Benyus, propone que los sistemas productivos deben inspirarse en la naturaleza, donde predominan ciclos cerrados y procesos que no generan residuos contaminantes. De manera similar, la economía azul, promovida por Gunter Pauli, sostiene que los sistemas económicos deben imitar los ecosistemas naturales, en los cuales todos los elementos cumplen una función y ningún recurso se desperdicia (Pauli, 2011).

Por su parte, el modelo “de la cuna a la cuna”, desarrollado por William McDonough y Michael Braungart, establece una distinción entre ciclos biológicos y técnicos. En los primeros,

los materiales biodegradables retornan al ambiente mediante procesos naturales como el compostaje, mientras que en los ciclos técnicos los materiales son recuperados mediante estrategias como la reutilización, reparación, remanufactura y reciclaje (Espinoza, H., A. 2023).

En el contexto global, la economía circular se ha posicionado como una estrategia clave para el cumplimiento de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Organismos como la Organización de las Naciones Unidas y la Ellen MacArthur Foundation destacan su potencial para reducir emisiones de gases de efecto invernadero, minimizar la generación de residuos y promover la recuperación económica.

Desde una perspectiva económica, la economía circular representa una oportunidad significativa para la generación de valor, empleo y crecimiento sostenible. Se estima que su implementación podría generar beneficios económicos globales de gran magnitud, así como fortalecer la resiliencia de los sistemas productivos (Arroyo, 2018).

Asimismo, su desarrollo contribuye a la reorientación de los modelos productivos hacia esquemas más sostenibles, promoviendo ventajas competitivas en un contexto globalizado y fomentando la innovación en diferentes sectores (Arroyo, 2018).

Finalmente, la economía circular continúa consolidándose como una alternativa al modelo lineal tradicional, siendo impulsada por políticas públicas y marcos regulatorios en regiones como la Unión Europea, a través de iniciativas como el Pacto Verde Europeo (Comisión Europea, 2022), así como por diferentes estrategias implementadas en América Latina y otras regiones del mundo.

La economía circular, implica una serie de procesos metodológicos orientados a su implementación en sistemas productivos (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Kirchherr et al.,

2017). En este sentido, su aplicación requiere la comprensión y análisis de los flujos de materiales y energía, con el fin de identificar los puntos críticos de generación de residuos y las oportunidades de aprovechamiento dentro de las cadenas productivas (Thomas E. Graedel & Braden R. Allenby, 1995).

Desde esta perspectiva, la implementación de la economía circular se desarrolla a partir de varias etapas. En primer lugar, se realiza un diagnóstico de los sistemas productivos, que permite identificar los tipos de residuos generados, sus características y su volumen. Posteriormente, se lleva a cabo un análisis de los flujos de materiales, con el objetivo de entender cómo circulan los recursos dentro del sistema y en qué puntos se generan pérdidas o ineficiencias (Geissdoerfer et al., 2017).

En una siguiente fase, se identifican alternativas de aprovechamiento, las cuales pueden incluir estrategias de reducción, reutilización, reciclaje y valorización de los residuos. Estas estrategias buscan reincorporar los subproductos al ciclo productivo, ya sea como insumos para el mismo sistema o para otros procesos productivos, promoviendo el cierre de ciclos (Kirchherr et al., 2017; Ellen MacArthur Foundation, 2015).

Adicionalmente, la economía circular incorpora herramientas metodológicas como el análisis de ciclo de vida (ACV), que permite evaluar los impactos ambientales de los productos a lo largo de todas sus etapas, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final (ISO, 2006). Asimismo, se emplean enfoques de producción más limpia y ecoeficiencia, orientados a optimizar el uso de recursos y minimizar la generación de residuos (Geissdoerfer et al., 2017).

En el contexto agroindustrial, y particularmente en la caficultura, este enfoque metodológico permite transformar los subproductos del proceso productivo en recursos con valor agregado, mediante su aprovechamiento en prácticas como el compostaje, la generación de bioinsumos o el tratamiento y reutilización de aguas residuales. De esta manera, la economía circular no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también fortalece la viabilidad económica y social de los sistemas productivos rurales (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

## **Subproductos del Café: Composición Química y Potencial de Aprovechamiento Sostenible**

De acuerdo con Mendes dos Santos, É., et al., (2021), solo en el periodo 2018 se produjeron cerca de 174.897 mil sacos de 60 kg a nivel mundial, lo que representa solo el 50% de la cosecha de café cereza, esto refleja la existencia y disponibilidad de una gran fuente de subproductos, los cuales tienen diferentes compuestos químicos y posibles aplicaciones.

Como se evidencia en la figura 2 los subproductos generados a lo largo de la cadena productiva del café, tales como la cáscara, la pulpa, la piel plateada y los pozos de café usados, presentan un alto potencial de aprovechamiento debido a sus múltiples aplicaciones funcionales y bioactivas, ampliamente respaldadas por la literatura científica. Estos subproductos, tradicionalmente considerados residuos, contienen compuestos de alto valor como polifenoles, cafeína, ácidos clorogénicos y fibras, lo que permite su valorización en diversos sectores productivos, incluyendo la agroindustria, la industria alimentaria, la cosmética y la farmacéutica.

La amplia variedad de aplicaciones reportadas, tales como propiedades antioxidantes, antimicrobianas, antiinflamatorias y emulsionantes, demuestra que los residuos del café pueden ser transformados en insumos estratégicos, contribuyendo a la reducción de impactos ambientales asociados a su disposición inadecuada (Mendes dos Santos, É., et al., 2021).

## Figura 2

### *Subproductos del Café y sus Aplicaciones*

Tabla 1. Subproductos del café y su aplicación.

Subproducto	Solicitud	Referencias
Cáscara	Antioxidante	Andrade et al. (2012); Blinová et al. (2017); Iriondo-DeHond et al. (2019)
Pulpa	Antioxidante	Ameca et al. (2018); Chaves-Ulate y Esquivel-Rodríguez (2019); Delgado et al. (2019); Geremu, Tola y Saaleh (2016); Heeger et al. (2017)
	Antimicrobiano	Chaves-Ulate y Esquivel-Rodríguez (2019); Duangjai et al. (2016)
	Antiinflamatorio	Magoni y otros (2018)
	Pigmento	Alves y otros (2017)
Piel plateada	Antioxidante	Ballesteros et al. (2014); Bessada et al. (2018); Blinová et al. (2017); Borrelli et al. (2004); Chaves-Ulate y Esquivel-Rodríguez (2019); Costa et al. (2018); Esquivel y Jiménez (2012); Janissen y Huyeh (2018); Martínez-Sáez et al. (2014); Murthy y Madhava Naidu (2012); Puga et al. (2017); Rodrigues et al. (2016); Rodrigues et al. (2015); Toschi et al. (2014)
	Antienvejecimiento	Castillo et al. (2013); Cho et al. (2017); Iriondo-DeHond et al. (2016)
	Antimicrobiano	Chaves-Ulate y Esquivel-Rodríguez (2019); Rodrigues et al. (2015)
	Anticelulítico	Rodrigues y otros (2016)
Posos de café usados	Antioxidante	Andrade et al. (2012); Ballesteros et al. (2014); Blinová et al. (2017); Campos-Vega et al. (2015); Mussatto, Ballesteros, Martins y Teixeira (2011)
	Antiinflamatorio	Campos-Vega et al. (2015); López-Barrera et al. (2016)
	Protector solar	Chiari et al. (2014); Marto et al. (2016)
	Antimicrobiano	Campos-Vega y otros (2015)
	Actividad emulsionante	Ballesteros y otros (2014)
	Estabilidad de la emulsión	Ballesteros y otros (2014)
	Hidratación	Ribeiro y otros (2013)

*Nota.* Mendes dos Santos, É., et al., (2021).

En particular, la pulpa de café destaca como uno de los subproductos con mayor versatilidad funcional, presentando aplicaciones antioxidantes, antimicrobianas, antiinflamatorias y como fuente de pigmentos naturales. Esta diversidad de usos confirma su riqueza en

compuestos orgánicos y nutrientes, lo cual justifica su aprovechamiento dentro de modelos de economía circular orientados al sector cafetero (Mendes dos Santos, É., et al., 2021).

La figura 3, también permite evidenciar la composición química de los principales subproductos del café como son la cáscara, pulpa, piel plateada y posos de café usados y permite identificar su alto potencial de aprovechamiento dentro de modelos de economía circular. Los resultados muestran que estos subproductos contienen cantidades significativas de compuestos orgánicos y bioactivos, tales como carbohidratos, fibra, celulosa, hemicelulosa, lignina, proteínas, minerales y compuestos fenólicos, lo que explica su versatilidad para diferentes aplicaciones agroindustriales y ambientales. En conjunto, la información presentada confirma que los residuos del café poseen una composición rica y compleja, que los convierte en materias primas con valor agregado y no simplemente en desechos (Mendes dos Santos, É., et al., 2021).

### Figura 3

#### *Subproductos del Café y sus Compuestos Químicos*

Tabla 2. Subproductos del café y sus compuestos químicos.

Compuestos químicos (%)	Cáscara	Pulpa	Piel plateada	Posos de café usados
Proteína	8-11	5-15	20	10.32
Lípidos	0,5-3	2.0-7.0	3	16
Minerales	3-7	9	-8	0,82-3,52
Gordo	0.5	2-7	2.2	2.29
Carbohidrato	58-85	21-32	0,25-6,35	-
Celulosa	43	63.0	17.8	8.6
Hemicelulosa	7	2.3	13.1	36.7
Sustancias pécticas totales	1.6	6.5	0.02	0.01
Lignina	9	14.3-17.5	1.0	0.05
Cafeína	-1	1.5	0,6-1,1	0.02
Ácido clorogénico	-2,5	2.4	3.0	2.3
Taninos	-5	3	0.02	0.02
Fibra total	24,0-30,8	60.5	60.0	43.0
Humedad	13.0-15.0	82.4	5-7	74.72
Ceniza	5.4-6.2	7.3	7.34-10.5	0,47

*Nota.* Mendes dos Santos, É., et al., (2021).

En particular, la pulpa de café se caracteriza por un alto contenido de humedad (82,4 %), fibra total (60,5 %), celulosa (63 %) y lignina (14,3-17,5 %), lo que la convierte en un sustrato altamente adecuado para procesos de compostaje. Estos componentes estructurales favorecen la actividad microbiana durante la descomposición, permitiendo la formación de compost estable y rico en materia orgánica. Además, la presencia de minerales (9 %) y compuestos nitrogenados como proteínas (5-15 %) contribuye a mejorar el valor nutricional del compost, lo que justifica su uso como enmienda orgánica para la fertilización de suelos agrícolas.

Por su parte, la cáscara de café presenta elevados contenidos de carbohidratos (58-85 %), fibra total (24-30,8 %) y compuestos fenólicos como taninos y ácido clorogénico, lo que

respalda su potencial antioxidante y su uso en aplicaciones alimentarias o funcionales. No obstante, su composición también sugiere que puede ser utilizada como material orgánico en procesos de valorización agrícola, siempre que se realice un manejo adecuado que controle su degradación y evite impactos ambientales negativos (Mendes dos Santos, É., et al., 2021).

La piel plateada y los pozos de café usados destacan por su contenido significativo de fibra total (60 % y 43 %, respectivamente), así como por la presencia de lípidos, hemicelulosa y compuestos bioactivos. En el caso de los pozos de café usados, el alto contenido de lípidos (16 %) y hemicelulosa (36,7 %) explica su potencial para aplicaciones industriales, energéticas o cosméticas. Sin embargo, desde una perspectiva agroambiental, estos subproductos también pueden integrarse en sistemas de manejo de residuos orgánicos, contribuyendo al cierre de ciclos de materia dentro de la cadena productiva del café (Mendes dos Santos, É., et al., 2021).

Esta información permite respaldar científicamente la implementación de estrategias de aprovechamiento sostenible de los subproductos del café, como el compostaje de pulpa y aguas mieles. La composición química rica en fibra, carbono orgánico y nutrientes esenciales favorece la transformación de estos residuos en abonos orgánicos, reduciendo la contaminación ambiental y mejorando la fertilidad del suelo (Mendes dos Santos, É., et al., 2021).

### **Tecnologías en el Tratamiento de Aguas Residuales**

En Colombia, instituciones como el Centro Nacional de Investigaciones del Café – Cenicafé, han desarrollado investigaciones durante más de 30 años orientadas a la implementación de sistemas de tratamiento acordes con el tipo de beneficio y la normatividad ambiental vigente en cada región. El despulpado y transporte de la pulpa sin agua hasta fosas techadas constituye una de las acciones preventivas más importantes, ya que evita que el 74 % de

la contaminación potencial de los subproductos del beneficio húmedo llegue a las fuentes hídricas (Rodríguez V., N., Castañeda, S. A., Quintero Y., L. V., & Osorio O., A. F. 2016).

### ***Sistemas Anaerobios***

Los reactores biológicos anaerobios han sido utilizados para el tratamiento de los efluentes del beneficio del café, en Nicaragua se han reportado eficiencias de remoción de la carga orgánica superiores al 80 %, en reactores con volúmenes entre 20 y 35 m<sup>3</sup>, operados a temperaturas entre 18 y 22 °C y con cargas aplicadas de 2 kg DQO/m<sup>3</sup>·día. Adicionalmente, los filtros anaerobios semienterrados constituyen una alternativa de tratamiento que permite la degradación de la materia orgánica mediante procesos biológicos en ausencia de oxígeno, favoreciendo la reducción de la carga contaminante antes de la disposición final del efluente (Rodríguez V., N., et al., 2016).

### ***Lagunas de Oxidación***

Los sistemas que combinan sedimentadores primarios con procesos biológicos en lagunas de oxidación han sido utilizados como tratamiento secundario de las aguas mieles. En estos sistemas se ha reportado la remoción de entre 40 % y 42 % de la carga orgánica, para efluentes con pH de 4,0 y concentraciones de DBO entre 10.000 y 15.000 ppm (Rodríguez V., N., et al., 2016).

### ***Humedales Artificiales***

Los humedales artificiales son sistemas construidos que simulan las características de los humedales naturales y representan una alternativa económica y de fácil operación para el tratamiento de aguas residuales, ya que requieren bajo mantenimiento y son tolerantes a las variaciones hidráulicas y de carga contaminante. Estos sistemas pueden clasificarse según la

posición del agua y el tipo de vegetación en humedales de flujo horizontal, flujo vertical o sistemas combinados, y según su configuración en sistemas de flujo superficial libre y de flujo subsuperficial (Rodríguez V., N., et al., 2016).

Para el diseño hidráulico de los humedales de flujo subsuperficial se utiliza el modelo de flujo pistón y el cálculo del tiempo de detención hidráulico en función de la concentración de entrada y salida de DBO y DQO. El medio filtrante presenta características específicas de porosidad y conductividad hidráulica; por ejemplo, la grava mediana tiene una porosidad entre 36 % y 40 % y una conductividad hidráulica entre 10.000 y 50.000  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$ , mientras que la roca triturada puede alcanzar conductividades entre 50.000 y 250.000  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$  (Rodríguez V., N., et al., 2016).

### ***Sistemas Sépticos y Tratamiento Doméstico en Fincas Cafeteras***

Las trampas de grasa permiten la separación física de aceites y grasas mediante la disminución de la velocidad del flujo, reteniendo estos compuestos antes de que el agua pase al tanque séptico. Para su diseño se establece una capacidad mínima de almacenamiento equivalente a una cuarta parte del caudal de diseño, un área de 0,25  $\text{m}^2$  por cada L/s, relaciones ancho:largo entre 1:4 y 1:18 y una velocidad ascendente mínima de 4 mm/s. Los tanques sépticos deben ubicarse a 1,5 m de construcciones, 3 m de árboles y 15 m de pozos o cuerpos de agua, y su profundidad útil varía entre 1,2 y 2,8 m dependiendo del volumen. El tiempo de retención hidráulica oscila entre 12 y 24 horas, según el caudal de aporte (Rodríguez V., N., et al., 2016).

### ***Campos de Infiltración***

Las zanjas de infiltración permiten la disposición final del efluente tratado en el suelo, asegurando una distribución homogénea del agua residual mediante tuberías perforadas sobre capas de grava. Se recomienda que todas las líneas tengan la misma longitud, que se ubiquen paralelas a las curvas de nivel en terrenos planos y que se establezca cobertura vegetal para favorecer la absorción del líquido.

La implementación de sistemas de tratamiento en fincas cafeteras ha permitido evitar el 29,5 % de la contaminación generada por los vertimientos del café, especialmente en el 50 % de las fincas ubicadas a menos de 200 m de los cuerpos de agua. Del total de contaminación evitada, el 96 % correspondió al tratamiento de aguas residuales del café y el 4 % al tratamiento de aguas residuales domésticas (Rodríguez V., N., et al., 2016).

### ***Filtros Verdes***

Los filtros verdes han mostrado resultados promisorios en el tratamiento de las aguas mieles del café; sin embargo, se recomienda su evaluación a escala de finca y durante periodos más prolongados para garantizar su funcionamiento a largo plazo y su adaptación a las condiciones del paisaje cafetero, como la pendiente, el tipo de suelo y la disponibilidad de área (Rodríguez V., N., et al., 2016).

### **Sostenibilidad del Café**

De acuerdo con Campos, T., Murga, V., Rituay, T., & Rosero, G (2021), la sostenibilidad de la caficultura se ha convertido en un tema central dentro de la investigación agropecuaria a nivel mundial, debido a la importancia económica, social y ambiental de este cultivo. El café constituye uno de los productos agrícolas más comercializados en el mundo y representa el

sustento de millones de personas, especialmente pequeños productores que dependen directamente de su producción para su seguridad económica y alimentaria.

Sin embargo, estos caficultores enfrentan múltiples desafíos relacionados con el acceso limitado a bienes y servicios agrarios, el cambio climático, la incidencia de plagas y enfermedades, y la creciente competencia en los mercados internacionales, factores que ponen en riesgo la sostenibilidad del sistema productivo. En este contexto, la sostenibilidad de la caficultura se entiende como un concepto multidimensional que integra las dimensiones ambiental, económica y social (Campos, T., et al., 2021).

Desde el enfoque ambiental, se evalúan aspectos como el uso eficiente de recursos naturales, la conservación del suelo, la reducción del uso de agroquímicos y la mitigación de impactos como la huella de carbono. En términos económicos, se analiza la rentabilidad del cultivo, la estabilidad de ingresos y la capacidad de los productores para mantenerse competitivos en el mercado. Por su parte, la dimensión social se relaciona con la calidad de vida de los caficultores, el fortalecimiento organizativo, la equidad y la gobernanza en los territorios rurales (Campos, T., et al., 2021).

Campos, T., et al., (2021), en su revisión bibliográfica coinciden en que la adopción de prácticas sostenibles, como la agroecología, el manejo adecuado de residuos, la diversificación productiva y la implementación de certificaciones voluntarias, contribuye significativamente a mejorar la sostenibilidad del cultivo de café. En particular, las certificaciones ambientales y sociales han demostrado generar beneficios como el acceso a mercados diferenciados, el fortalecimiento de capacidades organizativas y la mejora en los estándares productivos.

Asimismo, la asociatividad ha sido identificada como un factor clave, ya que permite a los pequeños productores acceder a capacitación, innovación tecnológica y mejores condiciones de comercialización. La evaluación de la sostenibilidad en la caficultura requiere herramientas metodológicas que permitan medir y analizar el desempeño de los sistemas productivos. En este sentido, se han desarrollado distintos enfoques, entre los cuales destacan los indicadores de sostenibilidad, los índices compuestos y los marcos de evaluación integrales (Campos, T., et al., 2021).

Uno de los más utilizados es el marco SAFA propuesto por la FAO, el cual permite analizar de manera holística el desempeño ambiental, social, económico y de gobernanza de los sistemas agrícolas. No obstante, la literatura señala que no existe un conjunto universal de indicadores aplicable a todos los contextos, por lo que la evaluación debe adaptarse a las características específicas de cada territorio y sistema productivo (Campos, T., et al., 2021).

Finalmente, la revisión bibliográfica sobre la sostenibilidad del café por (Campos, T., et al., 2021), los estudios revisados evidencian que la sostenibilidad de la caficultura depende de la interacción entre los actores de la cadena de valor y de la adopción de estrategias integrales que consideren tanto las condiciones locales como los retos globales del sector. En este sentido, evaluar la sostenibilidad no solo permite identificar fortalezas y debilidades en los sistemas productivos, sino que también constituye una herramienta fundamental para la formulación de políticas, programas y modelos de desarrollo que promuevan una caficultura más resiliente, competitiva y ambientalmente responsable.

## **Marco Conceptual**

### **Agronegocio y Cadena de Valor del Café**

El agronegocio se comprende como el conjunto de actividades productivas, económicas y comerciales relacionadas con la producción agrícola, que integran desde la producción primaria hasta la transformación y comercialización de los productos. En contextos rurales, estas unidades productivas suelen estar conformadas por organizaciones familiares y pequeños productores, especialmente en países en desarrollo, donde predominan estructuras informales y limitaciones en el acceso a mercados (Arosa-Carrera, 2016).

En este sentido, el agronegocio cafetero se articula a través de la cadena de valor del café, la cual comprende etapas como la producción, el procesamiento, el comercio, el tostado y la comercialización. Sin embargo, diversos estudios evidencian que solo una pequeña proporción del valor generado en esta cadena permanece en los países productores, lo que refleja desigualdades estructurales en la distribución de beneficios (Centro de Comercio Internacional, 2024). Esta situación plantea la necesidad de fortalecer estrategias que permitan generar mayor valor agregado en origen, especialmente para pequeños productores.

### **Asociatividad y Desarrollo Rural Sostenible**

La asociatividad rural se constituye como una estrategia organizativa clave para mejorar las condiciones productivas y socioeconómicas de los pequeños productores. Se basa en la cooperación voluntaria entre actores del territorio, quienes se agrupan con el propósito de alcanzar objetivos comunes relacionados con la productividad, la sostenibilidad y el desarrollo social (Confecámaras, 2024).

Este enfoque se articula con el concepto de desarrollo rural sostenible, entendido como un proceso integral que busca equilibrar las dimensiones económica, social y ambiental en los territorios rurales. Desde esta perspectiva, el desarrollo no solo depende del crecimiento económico, sino también de la capacidad de las comunidades para gestionar sus recursos de manera sostenible y fortalecer sus dinámicas organizativas (Suárez et al., 2023).

En el contexto cafetero, la asociatividad permite mejorar el acceso a tecnología, mercados y procesos de innovación, facilitando la adopción de modelos productivos más sostenibles y resilientes.

### **Economía Circular y Valorización de Residuos**

La economía circular se define como un modelo económico orientado a la optimización del uso de recursos, mediante la reducción, reutilización, reciclaje y valorización de materiales a lo largo de su ciclo de vida (Kirchherr et al., 2017). Este enfoque propone reemplazar el modelo lineal tradicional por sistemas productivos en los que los residuos se reintegran como insumos, promoviendo el cierre de ciclos y la sostenibilidad.

De acuerdo con la Ellen MacArthur Foundation, la economía circular se fundamenta en la regeneración de los sistemas naturales, la eliminación de residuos desde el diseño y la circulación continua de materiales. Asimismo, autores como Geissdoerfer et al. (2017) destacan su relación con el desarrollo sostenible, al integrar dimensiones ambientales, económicas y sociales.

En sistemas agroindustriales como la caficultura, este enfoque adquiere especial relevancia, ya que permite transformar los subproductos generados durante el proceso productivo

en recursos con valor agregado, reduciendo impactos ambientales y generando nuevas oportunidades económicas.

### **Subproductos del Café y Generación de Valor Agregado**

Los subproductos del café corresponden a los materiales residuales generados en las diferentes etapas del proceso de beneficio e industrialización del café, tales como la pulpa, el mucílago, el pergamino, la película plateada y las aguas residuales (Rodríguez & Zambrano, 2010). Tradicionalmente, estos materiales han sido considerados desechos; sin embargo, estudios recientes han demostrado su alto potencial de aprovechamiento.

En este contexto, el concepto de valor agregado se relaciona con la capacidad de transformar estos subproductos en bienes o servicios con mayor valor económico, mediante procesos de innovación y diferenciación (Universidad de Guadalajara, 2022). La generación de valor agregado permite no solo mejorar la rentabilidad de los sistemas productivos, sino también fortalecer la competitividad de los productores en el mercado.

Desde la perspectiva de la economía circular, la valorización de subproductos representa una estrategia clave para el aprovechamiento integral de los recursos, contribuyendo al cierre de ciclos productivos y a la sostenibilidad del sistema cafetero.

### **Innovación Tecnológica Rural**

La innovación tecnológica rural se entiende como un proceso dinámico que integra la generación, adaptación y aplicación de tecnologías orientadas a resolver problemáticas productivas, sociales y ambientales en los territorios rurales (Jiménez-Romera et al., 2017). Este proceso no se limita a la incorporación de tecnología externa, sino que también incluye la articulación de conocimientos locales y saberes tradicionales.

En el contexto de los agronegocios cafeteros, la innovación tecnológica desempeña un papel fundamental en la implementación de modelos de economía circular, ya que permite desarrollar soluciones para el aprovechamiento de subproductos, el tratamiento de residuos y la optimización de procesos productivos. De esta manera, la innovación se convierte en un elemento clave para fortalecer la sostenibilidad y la competitividad del sector).

## Antecedentes

### Referencias Internacionales

En el trabajo titulado “Economía circular del bagazo de café: emprendimiento-caso práctico”, por Espinola-Portilla & Villaseñor-Basulto (2025), que analizaron un caso aplicado sobre el aprovechamiento del bagazo de café desde el enfoque de la economía circular. El estudio se desarrolló en México, considerando el contexto del alto consumo de café en este país y la consecuente generación masiva de residuos, los cuales eran dispuestos principalmente en rellenos sanitarios, ocasionando impactos ambientales negativos como contaminación del suelo y agua, así como emisiones de gases de efecto invernadero.

El problema identificado por los autores estuvo relacionado con la falta de aprovechamiento de este residuo agroindustrial, a pesar de su potencial para ser transformado en productos de valor agregado. En este sentido, el objetivo del trabajo consistió en analizar un caso práctico de emprendimiento socioambiental que permitiera reutilizar el bagazo de café, mostrando el proceso desde la innovación científica hasta su comercialización dentro de un modelo de economía circular.

En cuanto al método, los autores emplearon un enfoque descriptivo basado en un estudio de caso. Para ello, describieron el proceso de diseño del emprendimiento, aplicando herramientas como el análisis del problema, el mapeo de actores, la teoría del cambio, el modelo Canvas y la elaboración de un plan de negocio que incluyó análisis de mercado, estrategias de marketing, proyecciones financieras y evaluación de riesgos. Este procedimiento permitió comprender de manera integral las dimensiones técnicas, económicas y sociales del proyecto.

La alternativa de economía circular implementada en el caso práctico consistió en la recolección del bagazo de café generado en cafeterías y su transformación en carbón activado, un producto con valor agregado utilizado en el tratamiento de agua, purificación del aire y aplicaciones industriales. Esta estrategia permitió cerrar el ciclo del residuo, reduciendo su disposición en vertederos y convirtiéndolo en un insumo útil para otros sectores productivos. Además, el modelo incluyó un servicio de recolección de residuos, la transformación tecnológica del material y su posterior comercialización.

Los resultados evidenciaron que esta alternativa permitió disminuir la cantidad de residuos enviados a rellenos sanitarios, reducir emisiones contaminantes y generar oportunidades económicas a partir de un desecho. Sin embargo, también se identificaron limitaciones, entre ellas la falta de interés de algunos actores para participar en el proceso, vacíos normativos sobre la gestión de residuos y los desafíos financieros propios del emprendimiento.

Finalmente, Espinola-Portilla et al., (2025), concluyeron que la economía circular representó una alternativa viable para transformar residuos del café en productos de valor, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y económica. No obstante, señalaron que su implementación requirió superar barreras como los altos costos iniciales, la necesidad de infraestructura, la articulación entre actores y el fortalecimiento de estrategias empresariales para asegurar la viabilidad del modelo.

Por su parte Requelme, H (2023), en su trabajo expone la propuesta de economía circular del cultivo de café en productores del centro poblado de Ñunyajalca, distrito Bagua Grande, región Amazonas (Perú), en una zona caracterizada por su alta producción cafetera. La investigación surgió ante la problemática del inadecuado manejo de los residuos generados

durante el procesamiento del café, especialmente la cáscara, la cual era generalmente desechada en el entorno, provocando contaminación del suelo, malos olores, proliferación de plagas y desaprovechamiento de un subproducto con potencial económico.

El objetivo del trabajo consistió en proponer un modelo de economía circular orientado al aprovechamiento sostenible de los subproductos del cultivo de café, con el fin de reducir los impactos ambientales y generar beneficios económicos adicionales para los productores. Para ello, el estudio adoptó un enfoque aplicado y descriptivo, empleando técnicas como entrevista a caficultores, observación directa del proceso productivo y análisis del manejo actual de residuos, lo que permitió identificar oportunidades de valorización de la cáscara de café dentro del sistema productivo (Requelme, H 2023).

En el marco de la propuesta, los autores plantearon un proceso estructurado para el manejo de la cáscara de café. En primer lugar, se realizó la recolección del residuo generado durante el beneficio del café, evitando su disposición directa en el suelo. Posteriormente, la cáscara fue clasificada y almacenada en condiciones adecuadas para prevenir su descomposición no controlada. Luego, se llevó a cabo un proceso de secado natural, el cual permitió reducir la humedad del material y facilitar su transformación. Una vez seco, el residuo fue utilizado principalmente para la producción de abono orgánico mediante compostaje y para la elaboración de encendedores artesanales, productos que posteriormente fueron reincorporados al sistema productivo o comercializados, cerrando así el ciclo dentro del enfoque de economía circular (Requelme, H 2023).

Los resultados evidenciaron que la cáscara de café presentó un alto potencial de aprovechamiento, ya que su transformación permitió reducir significativamente los niveles de

contaminación ambiental asociados a su disposición inadecuada. Asimismo, la producción de abono orgánico contribuyó a disminuir los costos en fertilizantes químicos y mejorar la fertilidad del suelo. De igual manera, la elaboración de encendedores artesanales generó nuevas oportunidades de ingresos para los productores, estimándose beneficios económicos adicionales aproximados de 320 soles por hectárea (Requelme, H 2023).

Finalmente, el estudio concluyó que la implementación de un modelo de economía circular en la caficultura resultó viable y beneficiosa, al permitir transformar residuos en recursos útiles, fortalecer la sostenibilidad ambiental del sistema productivo y diversificar las fuentes de ingreso de los caficultores. Los autores destacaron la importancia de la capacitación técnica y del acompañamiento institucional para garantizar la adopción efectiva de estas prácticas en el sector cafetalero (Requelme, H 2023).

### **Referencias Nacionales**

De acuerdo con Arboleda, V., Echeverría, M., & Jiménez, C (2023), en su artículo de revisión “La orientación tecnológica y la economía circular en el desempeño empresarial del sector cafetero” analizan cómo la adopción de tecnología y la implementación de prácticas sostenibles influyen en los resultados organizacionales de las empresas cafeteras. El estudio parte del reconocimiento de que el sector enfrenta importantes desafíos relacionados con la competitividad, la eficiencia productiva y la sostenibilidad ambiental. En este contexto, se señala que muchas empresas aún operan con métodos tradicionales, presentan limitaciones en el uso de tecnología y muestran baja aplicación de estrategias ambientales, lo que reduce su capacidad para adaptarse a las exigencias del mercado actual.

El objetivo principal de la investigación fue determinar la relación entre la orientación tecnológica, la economía circular y el desempeño empresarial en empresas del sector cafetero. Para lograrlo, se desarrolló un estudio con enfoque cuantitativo, diseño no experimental y alcance correlacional, mediante la aplicación de encuestas dirigidas a organizaciones cafeteras. Posteriormente, la información recopilada fue analizada con técnicas estadísticas que permitieron identificar el grado de influencia entre las variables estudiadas.

En cuanto a la orientación tecnológica, Arboleda, V., Echeverría, M., & Jiménez, C (2023), la definen como la capacidad de las empresas para incorporar innovaciones, adoptar herramientas tecnológicas, mejorar sus procesos productivos y fortalecer las competencias del talento humano. Se explica que las empresas con mayor orientación tecnológica tienden a ser más competitivas, eficientes y capaces de responder a los cambios del entorno. Se menciona ejemplos concretos como el uso de filtros verdes para el tratamiento de aguas residuales del beneficio del café, los cuales permiten reducir la contaminación y mejorar la sostenibilidad ambiental del proceso productivo.

Respecto a la economía circular, Arboleda, V., Echeverría, M., & Jiménez, C (2023), lo presentan como un enfoque que busca sustituir el modelo productivo lineal tradicional por un sistema basado en el uso eficiente de los recursos, la reducción de residuos y el aprovechamiento de subproductos. En el sector cafetero, esto implica la valorización de los residuos generados durante el beneficio del café, la reutilización de materiales y la adopción de prácticas que minimicen los impactos ambientales.

El desempeño empresarial se analiza como la capacidad de las empresas para lograr productividad, rentabilidad, competitividad y eficiencia organizacional. El estudio de Arboleda,

V., et al, (2023), demuestra que existe una relación positiva y significativa entre la orientación tecnológica y el desempeño empresarial, evidenciando que las empresas que invierten en innovación y tecnología obtienen mejores resultados. De igual manera, se encontró que la aplicación de prácticas de economía circular contribuye a optimizar el uso de recursos, reducir costos y fortalecer la sostenibilidad, lo cual también impacta favorablemente en el desempeño organizacional.

Finalmente, Arboleda, V., et al., (2023), concluyen que la integración de la orientación tecnológica y la economía circular constituye un factor clave para el fortalecimiento del sector cafetero. Se recomienda que las empresas impulsen la innovación tecnológica, promuevan la capacitación del personal y adopten estrategias sostenibles orientadas al aprovechamiento eficiente de los recursos. Estas acciones permitirían mejorar la competitividad, garantizar la sostenibilidad ambiental y asegurar el crecimiento empresarial a largo plazo dentro del sector cafetero.

Por su parte Barajas, V (2021), en su proyecto de investigación llamado “Modelo circular de aprovechamiento de la biomasa residual de café en Colombia: caso de estudio análisis de una finca tipo de la zona cafetera” analizó el potencial de valorización energética de los residuos del café. El proyecto se desarrolló en el contexto de la zona cafetera del eje cafetero colombiano, tomando como referencia una finca representativa de aproximadamente 1,3 hectáreas, tamaño que corresponde al 95 % de las fincas cafeteras de la región.

La problemática identificada se centró en la gran cantidad de residuos generados durante el beneficio húmedo del café. Barajas, V (2021), señala que solo el 9,5 % del fruto se convierte en la parte consumible, mientras que el 90,5 % restante corresponde a subproductos residuales,

lo cual genera impactos ambientales y representa un desaprovechamiento de recursos potencialmente valiosos. Además, se menciona que muchas zonas cafeteras presentan limitaciones en acceso a servicios energéticos, lo que agrava la necesidad de soluciones sostenibles para el manejo de estos residuos.

Por lo que se dispuso en proponer un modelo circular de aprovechamiento energético proveniente de la biomasa residual del café en Colombia, orientado a transformar dichos residuos en recursos útiles mediante tecnologías limpias. Entre los objetivos específicos se destacaron: estimar el potencial de producción de biogás a partir de la biomasa residual, evaluar la viabilidad del modelo para satisfacer la demanda energética de pequeños caficultores y establecer lineamientos técnicos para garantizar la sostenibilidad del sistema propuesto.

En cuanto a la metodología, el estudio empleó el enfoque DMAIC (Six Sigma), utilizado como marco para la resolución de problemas de sostenibilidad. Este método incluyó fases como la definición del caso de estudio, la estimación del potencial de biomasa, el análisis técnico del sistema de captación, la evaluación costo-beneficio, el diseño del modelo circular y la formulación de planes operativos para el biodigestor. Además, se aplicó la herramienta de evaluación de sostenibilidad conocida como la rueda de LIDS, que permitió analizar el impacto del modelo durante su ciclo de vida.

Respecto a los resultados, Barajas, V (2021), determinó que una finca cafetera promedio puede generar cantidades significativas de biomasa residual con potencial energético. Se estimó que la digestión anaeróbica de la pulpa de café permite producir biogás suficiente para suplir necesidades domésticas de cocción y energía básica, así como biosólidos con alto valor nutritivo para fertilización de suelos. Asimismo, el análisis evidenció beneficios económicos asociados a

la sustitución parcial del gas natural y ventajas ambientales derivadas de la reducción de residuos y emisiones contaminantes.

Finalmente, Barajas, V (2021), concluyó que el aprovechamiento energético de la biomasa residual del café mediante biodigestores constituye una alternativa viable, sostenible y de bajo costo para pequeños caficultores. El modelo propuesto no solo contribuye a la gestión ambiental de residuos, sino que también fortalece la competitividad del sector cafetero al generar energías renovables y biofertilizantes. Además, el estudio resalta la necesidad de promover políticas públicas que faciliten la implementación de tecnologías de bioenergía a pequeña escala en zonas rurales cafeteras.

## Marco Contextual

El desarrollo del presente proyecto se realizó en el distrito el Carmen ubicado aproximadamente a 24 minutos del municipio de Oporapa del departamento del Huila, Colombia. Cuenta con una altitud aproximada de 1.350 m s. n. m., con coordenadas geográficas cercanas a los 1°41' de latitud norte y 76°03' de longitud oeste. El municipio de Oporapa limita al norte con el municipio de Saladoblanco, al sur con Tarqui, al oriente con Isnos y al occidente con Pitalito (Alcaldía de Oporapa 2023).

El territorio presenta un clima templado húmedo de montaña, con temperaturas promedio entre 18 °C y 23 °C, humedad relativa cercana al 75–80 % y precipitaciones anuales que oscilan entre 1.500 y 2.000 mm. Este territorio se caracteriza por su vocación agropecuaria, donde las actividades agrícolas constituyen la base de la economía local. El municipio de Oporapa cuenta con una extensión aproximada de 188 km<sup>2</sup> y una población de 11.779 habitantes, de los cuales cerca del 80 % reside en la zona rural. Esta condición refleja una fuerte dependencia de las actividades productivas del sector primario, destacándose especialmente el cultivo del café como eje económico y social del territorio (Alcaldía de Oporapa 2023).

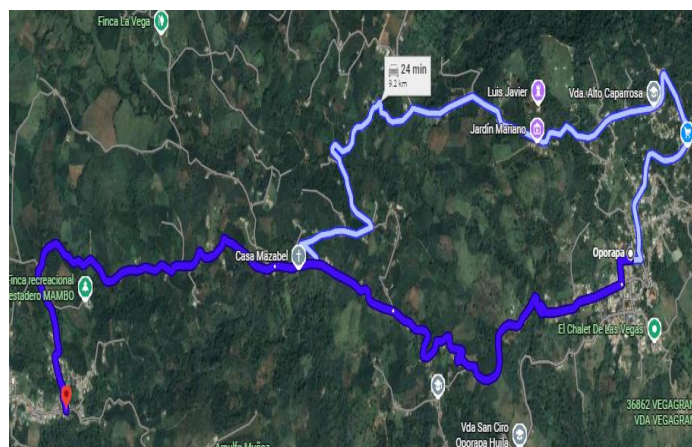
El contexto productivo del distrito El Carmen presenta limitaciones asociadas al acceso a tecnologías de beneficio sostenible, infraestructura para el tratamiento de residuos y procesos de capacitación técnica en manejo ambiental. Estas condiciones influyen en la adopción de prácticas productivas tradicionales, donde el aprovechamiento de los subproductos del café aún es limitado.

No obstante, el territorio cuenta con un importante potencial para la implementación de estrategias de economía circular, debido a la alta disponibilidad de biomasa cafetera, la presencia

de organizaciones de productores y el interés institucional en promover modelos de producción sostenible. En este sentido, el distrito El Carmen constituye un escenario pertinente para el desarrollo de propuestas orientadas al aprovechamiento eficiente de los subproductos del café y al fortalecimiento de la sostenibilidad de los agronegocios cafeteros.

#### Figura 4

*Ubicación Distrito EL Carmen de Oporapa Huila, Colombia*



*Nota.* GoogleMaps (2025)

## Metodología

### Tipo de Estudio

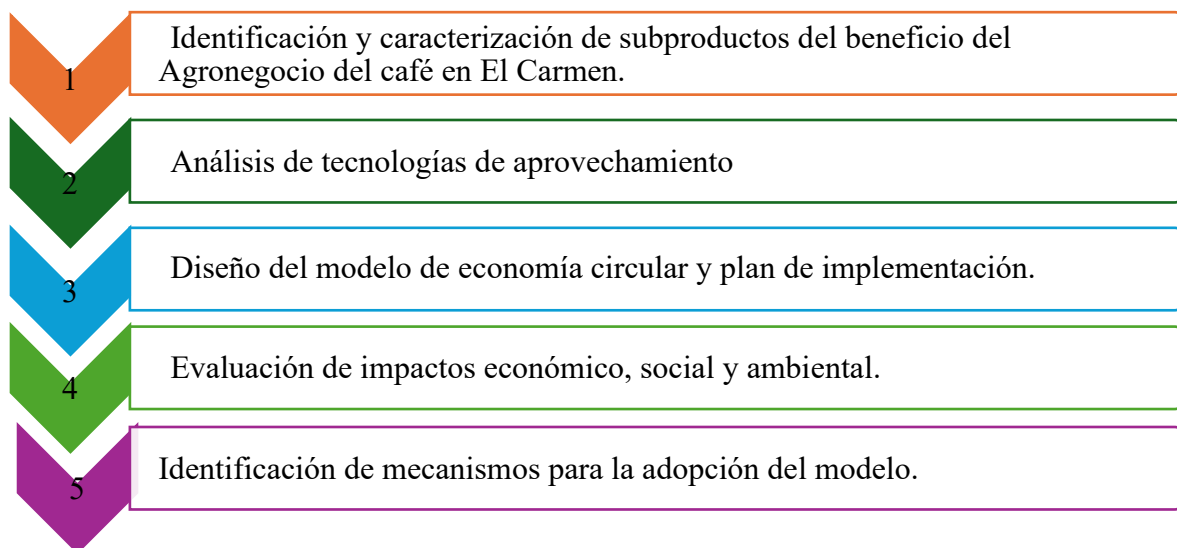
El presente proyecto aplicado se desarrolló bajo un enfoque mixto (cuantitativo-cualitativo), de tipo descriptivo y propositivo, orientado a diagnosticar, diseñar y evaluar un modelo de economía circular para la gestión de los subproductos del beneficio del café, con proyección hacia su implementación en el distrito El Carmen, municipio de Oporapa (Huila).

### Diseño Metodológico

El estudio adoptó un diseño no experimental de corte transversal y con alcance diagnóstico, debido a que no se manipularon variables y la información fue recolectada en un único momento del tiempo y fue desarrollado en cinco fases:

### Figura 5

#### *Cronología del Sistema Metodológico*



*Nota.* En la figura se ve reflejado de la cronología.

## **Población y Muestra**

La población objetivo estuvo compuesta por las 743 familias caficultoras que habitan en el distrito El Carmen, las cuales administran aproximadamente 970 hectáreas cultivadas en café, dentro de las 3045 hectáreas reportadas a nivel municipal (Comité de Cafeteros del Huila, 2023).

## **Técnica de Muestreo**

Se empleó un muestreo aleatorio estratificado, considerando:

El tamaño del cultivo (pequeños, medianos y grandes productores), el acceso a tecnologías de beneficio y el nivel de organización productiva (individual, asociaciones y cooperativas). Esta técnica permitió garantizar la representatividad de la muestra en función de las características socio-productivas heterogéneas del territorio

## **Tamaño de Muestra**

El tamaño de la muestra se calculó mediante la fórmula para población finita con:

Nivel de confianza del 95 %

Margen de error del 7 %

Variabilidad de 0,5

Obteniéndose una muestra de 100 productores. A continuación, se presenta el procedimiento del cálculo del tamaño de la muestra.

### ***Fórmula Para Población Finita***

$$n = \frac{N \cdot n_0}{N + n_0 - 1}$$

Paso 1: Calcular  $n_0$

$$n_0 = \frac{(1.96)^2 \times (0.5) \times (0.5)}{(0.0912)^2}$$

Primero se resolvió cada parte de la formula:

- $Z^2 = 1.96^2 = 3.8416$
- $p \times q = 0.5 \times 0.5 = 0.25$
- $e^2 = 0.0912^2 = 0.00832$

Ahora sustituyendo:

$$n_0 = \frac{3.8416 \times 0.25}{0.00832} n_0 = \frac{0.9604}{0.00832} = 115.4$$

Población finita:

$$n = \frac{N \cdot n_0}{N + n_0 - 1} n = \frac{743 \times 115.4}{743 + 115.4 - 1} n = \frac{85722.2}{857.4} = 99.96 = 100$$

**Tabla 1**

*Datos del Cálculo de la Muestra*

Parámetro	Valor	Significado
N	743	Total, de caficultores
Z	1.96	Nivel de confianza del 95 %
P	0.5	Variabilidad máxima
E	0.0912 (9,1 %)	Margen de error

---

N	100	Tamaño de muestra resultante
---	-----	---------------------------------

---

*Nota.* Dentro del cálculo de la muestra se encuentran los parámetros el valor y su significado.

## **Variables e Indicadores**

### ***Variable 1. Manejo de Subproductos del Café***

La fuente se obtuvo a partir de la información primaria (entrevista)

#### ***Indicadores***

- Tipo de subproductos generados (% de productores)
- Forma de disposición o aprovechamiento de los residuos (%)
- Nivel de adopción de tecnologías de aprovechamiento (%)
- Costo anual del manejo de residuos (\$/año)
- Disposición para implementar modelos de aprovechamiento (%)
- Tipo de apoyo requerido para su implementación (%)
- Nivel de importancia del aprovechamiento de residuos (escala Likert 1–5)
- Percepción del beneficio comunitario (%)

### ***Variable 2. Viabilidad Económica del modelo***

#### ***Indicadores***

- Costos de implementación (\$)
- Relación beneficio/costo
- Valor Actual Neto (VAN) (\$)
- Tasa Interna de Retorno (TIR) (%)

### ***Variable 3. Impacto Social***

Los impactos sociales presentados corresponden a proyecciones estimadas con base en la información diagnóstica recolectada en el distrito El Carmen. Debido a que el modelo aún no ha sido implementado, los resultados deben interpretarse como escenarios potenciales construidos mediante análisis porcentual y proyección estadística simple.

#### ***Indicadores***

- Número potencial de familias beneficiadas

**Indicador Proyectado.** Número estimado de familias que podrían adoptar el modelo

**Técnica de Medición.** Proyección estadística basada en línea base

**Unidad de Medida.** Número de familias

**Instrumento.** Base de datos diagnóstica (paso 1) y análisis porcentual

- Nivel estimado de adopción tecnológica (%)

**Indicador Proyectado.** Tasa potencial de adopción tecnológica

**Técnica de Medición.** Estimación porcentual basada en encuesta de intención

**Unidad de Medida.** Número de familias

**Instrumento.** Base de datos diagnóstica (paso 1) y análisis porcentual

- Nivel de fortalecimiento organizativo esperado (%)

**Indicador Proyectado.** Incremento esperado en asociatividad

**Técnica de Medición.** Análisis comparativo hipotético (escenario actual vs escenario con intervención)

**Unidad de Medida.** % de productores asociados

**Instrumento.** Base de datos diagnóstica y análisis porcentual

- Disposición de adoptar modelo de aprovechamiento (%)

**Indicador Proyectado.** Número estimado de productores que requerirían capacitación

**Técnica de Medición.** Proyección basada en población objetivo

**Unidad de Medida.** % de productores asociados

**Instrumento.** Base de datos diagnóstica y análisis porcentual

#### ***Variable 4. Impacto Ambiental***

##### ***Indicadores***

- Reducción estimada de residuos orgánicos sin tratamiento especialmente pulpa (ton/año)

**Técnica de Medición.** Estimación indirecta mediante cálculo de generación y aprovechamiento de residuos orgánicos, a partir de:

- Área cafetera del distrito
- Coeficiente de generación de pulpa por hectárea
- Factor de reducción de humedad durante la descomposición

**Unidad de Medida.** toneladas por año (Ton/año) y porcentaje de aprovechamiento (%)

**Instrumento Utilizado.** Hoja de cálculo para estimación de generación y transformación de residuos orgánicos a partir de datos secundarios.

**Fuente.** Federación Nacional de Cafeteros (área cultivada y coeficientes de producción) y Cálculos propios del estudio

- Reducción proyectada del volumen de aguas residuales contaminantes generadas durante el proceso de beneficio del café

**Técnica de Medición.** Estimación indirecta mediante con base a datos secundarios. Cálculo volumétrico, a partir de: Área cafetera del distrito (ha), Consumo promedio de agua por hectárea en beneficio húmedo, Proyección anual de generación de aguas mieles. Es un cálculo técnico multiplicativo: Área (ha) × Consumo promedio (m<sup>3</sup>/ha)

**Unidad de Medida.** Metros cúbicos por año (m<sup>3</sup>/año), Porcentaje de tratamiento (%)

**Instrumento Utilizado.** Hoja de cálculo (Excel) para proyección volumétrica, Base de datos de caracterización productiva, Información técnica secundaria sobre consumo hídrico

- Potencial reducción de la carga contaminante asociada a los vertimientos del beneficio húmedo del café

**Técnica de Medición.** Análisis comparativo documental (no experimental), basado en: Valores de DQO reportados para beneficio tradicional, Evidencia técnica sobre reducción de carga contaminante en sistemas ecológicos. No es medición directa, es comparación teórica.

**Unidad de Medida.** Gramos de DQO por kilogramo de café pergamino seco (g DQO/kg CPS), Reducción porcentual estimada (%)

**Instrumento.** Revisión documental (Avance Técnico 543 de Cenicafé), Matriz comparativa de tecnologías, Análisis de literatura científica.

### **Procedimiento**

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo mediante una secuencia de cinco pasos metodológicos articulados entre sí, los cuales permitieron el diagnóstico, diseño, evaluación y validación del modelo de economía circular para la gestión de subproductos del café en el distrito El Carmen, municipio de Oporapa (Huila).

#### ***Paso 1. Identificación y Caracterización de los Subproductos del Beneficio del Café***

Se definió como población de estudio a las 743 familias caficultoras del distrito El Carmen, que administran aproximadamente 970 hectáreas en café, de acuerdo con información del Comité de Cafeteros del Huila (2023), seguido se determinó el tamaño de la muestra mediante la fórmula de muestreo para población finita, con un nivel de confianza del 95 % y un margen de error del 9,1 %, obteniendo como resultado una muestra de 100 productores.

Se aplicó un muestreo aleatorio estratificado, considerando como criterios como el tamaño del cultivo, acceso a tecnologías de beneficio, nivel de organización productiva.

Se diseñó y aplicó una entrevista semiestructurada en campo para recolectar información relacionada con: características generales del sistema productivo, manejo actual de los subproductos del beneficio, aspectos técnicos y económicos, percepciones frente al aprovechamiento de residuos.

La información recolectada fue organizada y analizada mediante estadística descriptiva para identificar los principales subproductos generados, su volumen estimado y su manejo actual en las fincas.

### ***Paso 2. Análisis de Tecnologías y Procesos para la Transformación de Subproductos***

Se realizó una revisión documental de literatura científica en bases de datos como Scopus, ScienceDirect y Google Scholar, así como de documentos técnicos de la Cenicafé y la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, utilizando palabras clave como pulpa de café, aguas mieles, valorización de residuos, compostaje y economía circular en caficultura, seleccionando publicaciones de los últimos cinco años y aquellas con aplicación en sistemas productivos de pequeña escala, esto permitió identificar las tecnologías y alternativas de aprovechamiento de los subproductos del café.

Se seleccionaron las alternativas más pertinentes para el contexto del distrito El Carmen.

### ***Paso 3. Diseño del Modelo de Economía Circular y Formulación del Plan de Implementación***

Se estructuró un modelo conceptual de economía circular con base en los resultados del diagnóstico (Paso 1), las tecnologías priorizadas (Paso 2). Este modelo incluyó la identificación de flujos de subproductos, las opciones de valorización técnica (compostaje, bioinsumos, reutilización de aguas residuales, entre otros) y los actores involucrados en su implementación.

Se formuló el plan de implementación del modelo, el cual incluyó: actividades técnicas requeridas, cronograma de ejecución, recursos físicos y financieros, definición de roles y responsabilidades, estrategias de capacitación y fortalecimiento de capacidades.

Se realizó la articulación del modelo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), identificando sus principales aportes en términos de producción sostenible, gestión ambiental e innovación rural.

#### ***Paso 4. Evaluación del Impacto Económico, Social y Ambiental del Modelo***

Se efectuó un análisis económico comparativo entre el manejo actual de la fertilización convencional por el productor con el uso de productos comerciales de síntesis química frente al escenario de la fertilización empleando la economía circular que integra el aprovechamiento de subproductos en su forma de pulpa descompuesta, en combinación con la fertilización química, (fertilización orgánico-mineral): evaluando el análisis costo–beneficio, Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR),

Se estimaron los beneficios económicos asociados a la reducción en costos para la fertilización en campo tras la comparación de los dos escenarios.

Se evaluó el impacto social mediante indicadores proyectados como:

- Número estimado de familias beneficiadas
- Nivel estimado de adopción tecnológica (%)
- Nivel de fortalecimiento organizativo esperado (%)

Se realizó una evaluación ambiental ex ante utilizando indicadores relacionados con:

- Reducción estimada de residuos orgánicos sin tratamiento especialmente pulpa (ton/año)
- Reducción proyectada del volumen de aguas residuales contaminantes generadas durante el proceso de beneficio del café
- Potencial reducción de la carga contaminante asociada a los vertimientos del beneficio húmedo del café

La reducción estimada de residuos orgánico se estimó mediante cálculo del volumen de pulpa generada y su transformación en abono orgánico a partir del área cafetera del distrito y factores de reducción de humedad reportados en la literatura.

La reducción proyectada del volumen de aguas residuales se estimó mediante cálculo volumétrico indirecto, multiplicando el área cafetera del distrito por el consumo promedio de agua reportado para el beneficio húmedo del café. Los datos fueron procesados en hoja de cálculo a partir de información secundaria y la caracterización del sistema productivo local.

La reducción de la carga contaminante fue evaluada mediante análisis comparativo de valores de Demanda Química de Oxígeno (DQO) reportados en literatura técnica para sistemas tradicionales de beneficio húmedo frente a sistemas ecológicos con tratamiento de aguas mieles. No se realizaron mediciones directas en laboratorio, por lo que el indicador corresponde a una estimación teórica basada en fuentes secundarias.

#### ***Paso 5. Identificación de Mecanismos para la Implementación del Modelo***

Se desarrolló un grupo focal con caficultores, líderes comunitarios, asociaciones y actores institucionales del sector. Se socializó el modelo de economía circular propuesto, haciendo énfasis en su implementación a nivel de finca. Se orientó la discusión hacia la identificación de: barreras para la implementación, apoyos institucionales requeridos, estrategias para facilitar la adopción del modelo.

La información obtenida se sistematizó mediante análisis cualitativo de contenido.

Se definieron los mecanismos clave para la implementación del modelo que estuvieron relacionados con financiación, asistencia técnica, capacitación, incentivos ambientales y transferencia tecnológica.

## Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información

### *Entrevista Semiestructurada*

**Objetivo.** Caracterizar la situación productiva y organizativa de los caficultores, así como el manejo actual de subproductos del café (cáscara, mucílago, aguas mieles, etc.) y obtener información sobre aspectos técnicos, económicos y percepciones frente al modelo de economía circular.

**Construcción.** La guía de entrevista fue elaborada por el investigador del estudio, basada en criterios de producción sostenible, economía circular y manejo de residuos del café, adaptando preguntas de estudios previos sobre manejo de subproductos en la caficultura (Zambrano-Franco & Izaza-Hinestroza, 1998; Gallego Ocampo & Mejía Francia, 2016).

**Población y Muestra.** Se aplicó a 100 productores de café del distrito El Carmen, seleccionados mediante muestreo intencional por representatividad de tamaño de finca y tipo de organización (asociados y no asociados).

**Fechas y Horario.** Las entrevistas se realizaron entre agosto y septiembre 2025, en horario de 8:00 a.m. a 4:00 p.m., dependiendo de la disponibilidad de los productores.

**Duración.** Cada entrevista tuvo una duración promedio de 10–15 minutos.

**Consentimiento Informado.** Se solicitó autorización verbal y escrita para el uso de la información personal y de producción, conforme a la normativa vigente de protección de datos (Ver Apéndice 5).

### ***Revisión Documental (Artículos Científicos, FNC, Cenicafé)***

**Objetivo.** Analizar el estado del arte y evidencia técnica sobre el aprovechamiento de subproductos del café y el tratamiento de aguas residuales, incluyendo criterios ambientales, técnicos y económicos.

**Construcción.** Se elaboró una revisión documental para recopilar metodologías previas en evaluación de tecnologías agrícolas y modelos de economía circular en el beneficio del café (Cenicafé, 2022; FNC, 2021).

**Fuentes.** Artículos científicos, informes técnicos de Cenicafé, Federación Nacional de Cafeteros y literatura especializada.

**Criterios de Inclusión.** Documentos publicados entre 2013 y 2026, que abordaran manejo de residuos del café, tecnologías de beneficio húmedo y economía circular en el sector caficultor.

### ***Grupo Focal – Entrevista Focal***

**Objetivo.** Socializar el modelo de economía circular, identificar barreras y oportunidades para su implementación y conocer mecanismos institucionales de apoyo.

**Construcción.** La dinámica del grupo focal se estructuró mediante una guía de entrevista con tres preguntas clave (Ver Apéndice 6). (Arteaga-Cuba et al., 2021).

**Población.** Participaron 60 personas, incluyendo caficultores, líderes comunitarios, miembros de cooperativas y representantes de instituciones locales.

**Fechas y Horario.** Se desarrolló en noviembre de 2025, en una sesión de 90 minutos, en salón comunitario del el Carmen con las condiciones adecuadas para la discusión.

**Consentimiento Informado.** Se explicó a los participantes los fines del estudio y se solicitó autorización para uso de la información recolectada de manera confidencial.

### **Validación de Instrumentos**

La entrevista semiestructurada y la entrevista del grupo focal fueron sometidas a:

- Juicio de expertos (académico y técnico del sector cafetero)
- Prueba piloto con un grupo reducido de caficultores

Con el fin de evaluar la claridad de las preguntas, pertinencia de los contenidos y tiempo de aplicación

### **Consideraciones Éticas**

Todos los participantes que suministraron datos personales firmaron un consentimiento informado por escrito, en el que se explicó los objetivos del estudio, el uso exclusivo de los datos para fines académicos e investigativos, y la confidencialidad de la información. Se informó a los participantes que podían revocar su autorización en cualquier momento y ejercer sus derechos de acceso, actualización y supresión de datos, en cumplimiento de la Ley 1581 de 2012 y decretos reglamentarios.

Los datos recolectados fueron almacenados de manera segura, codificados para proteger la identidad de los participantes, y utilizados exclusivamente para la elaboración de análisis y proyecciones del estudio

## **Resultados**

### **Identificar y Caracterizar los Principales Subproductos Residuales Generados en los Agronegocios de Café en El Carmen**

Teniendo en cuenta que la población de estudio estuvo conformada por 743 familias caficultoras del distrito El Carmen, en el municipio de Oporapa, de las cuales se seleccionó una muestra representativa de 100 productores mediante muestreo aleatorio estratificado, se logró identificar y caracterizar los principales subproductos residuales generados en los agronegocios cafeteros.

La entrevista permitió analizar variables relacionadas con el tamaño del cultivo, el tipo de organización productiva, los residuos generados durante el proceso de beneficio del café, las prácticas actuales de manejo y disposición, el nivel de conocimiento y aplicación de tecnologías de aprovechamiento, los costos asociados a la gestión de residuos, así como la disposición de los productores para implementar modelos de economía circular y los apoyos requeridos para su adopción.

Asimismo, se evaluó la percepción de los caficultores frente a la importancia del aprovechamiento de los subproductos y el potencial impacto comunitario de estas estrategias, lo cual permitió obtener una visión integral sobre las condiciones actuales y las oportunidades de valorización de los residuos del café en el territorio.

#### ***Tamaño del Cultivo***

Como se observa en la tabla 2, la vereda La Esmeralda presenta el mayor tamaño promedio (2,15 ha), seguida de Corinto y El Carmen (2,04 ha), lo que indica una ligera mayor

capacidad productiva en estos sectores. Por el contrario, San Ciro registra el promedio más bajo (1,63 ha), evidenciando una mayor fragmentación de la propiedad cafetera.

**Tabla 2**

*Resumen de Muestreo de Distrito El Carmen por Vereda, 8 Localidades.*

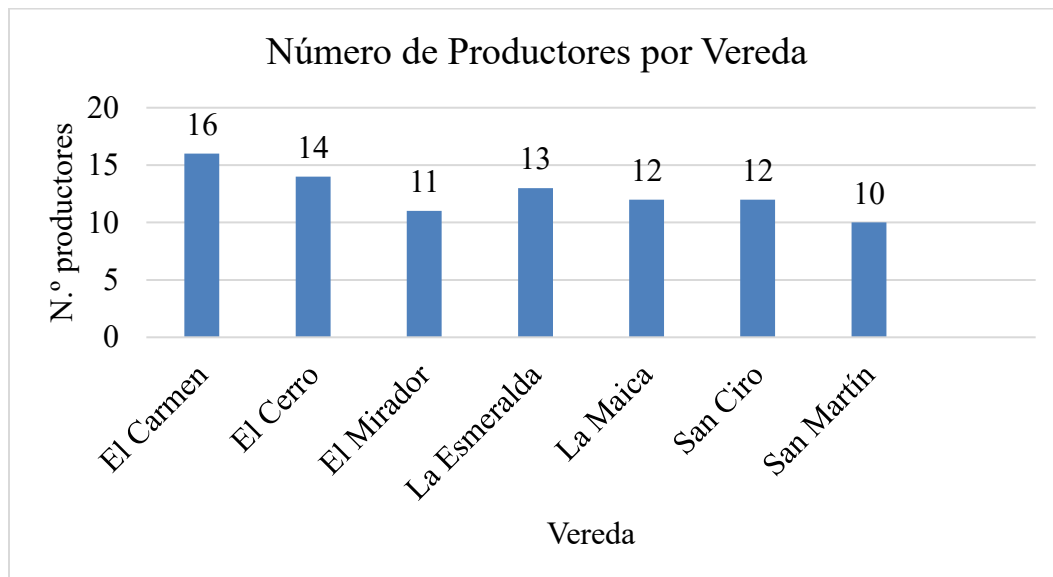
Vereda	N.º Productores	Promedio Tamaño (ha)
Corinto	12	2,04
El Carmen	16	2,04
El Cerro	14	1,99
El Mirador	11	1,75
La		
Esmeralda	13	2,15
La Maica	12	1,86
San Ciro	12	1,63
San Martín	10	1,81

*Nota.* El Resumen de la vereda según el número de productores y el promedio.

De igual forma, la figura 6 muestra que los productores encuestados pertenecen a ocho veredas del distrito El Carmen. La vereda con mayor número de productores encuestados fue El Carmen (16), seguida de El Cerro (14) y La Esmeralda (13), mientras que San Martín registró la menor participación con 10 productores.

**Figura 6**

*Resumen de Numero de Productores por Vereda.*



*Nota.* En la gráfica se visualiza el número de los productos segmentados en vereda.

En términos del área de producción de las unidades productivas, como se puede observar en la tabla 2, predominan las unidades productivas de pequeña escala, ya que en todas las veredas el promedio se mantiene por debajo de 3 hectáreas. En general, se puede afirmar que el sistema productivo del territorio se caracteriza por minifundios cafeteros, condición que influye directamente en las posibilidades de inversión y adopción tecnológica.

**Tabla 3**

*Porcentaje de Participación del Tamaño del Cultivo (Ha)*

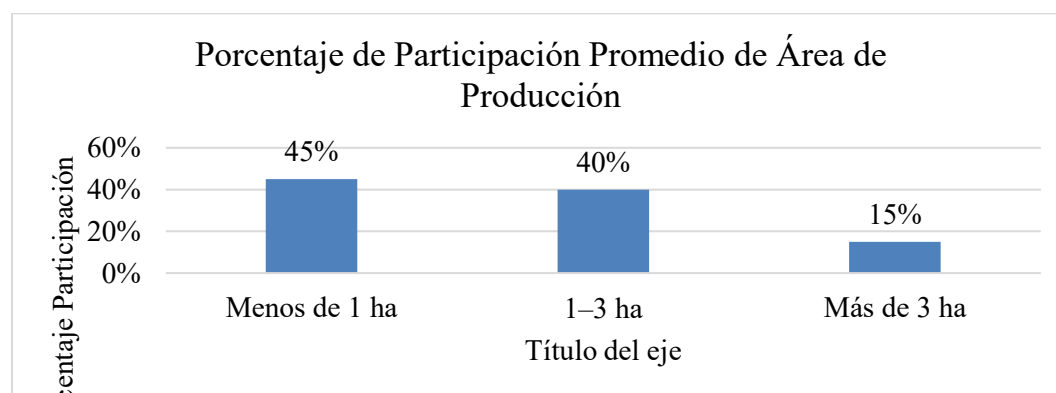
Variable	Categoría	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
Tamaño del cultivo (ha)	Menos de 1 ha	45	45 %
	1–3 ha	40	40 %
	Más de 3 ha	15	15 %
Total, encuestados		100	100 %

*Nota.* El porcentaje de participación se realiza con la variable, categoría, frecuencia y el porcentaje.

Como muestra la figura 7 el 45% de los productores poseen menos de 1 ha y el 40% tiene entre 1 a 3 ha, solo el 15% cuenta con más de 3 ha de café.

**Figura 7**

*Porcentaje de Participación Promedio de Área de Producción*



*Nota.* Gráfica de porcentaje de participación promedio.

### *Tipo de Organización*

La tabla 3 permite observar el porcentaje de participación de los tipos de organización del distrito.

**Tabla 4**

*Información General de los Productores Encuestados.*

Variable	Categoría	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
Tipo de organización	Individual	55	55 %
	Asociación	30	30 %
	Cooperativa	15	15 %
Total, encuestados		100	100 %

*Nota.* La información general de los productores encuestados se realiza con la variable, categoría, frecuencia y el porcentaje.

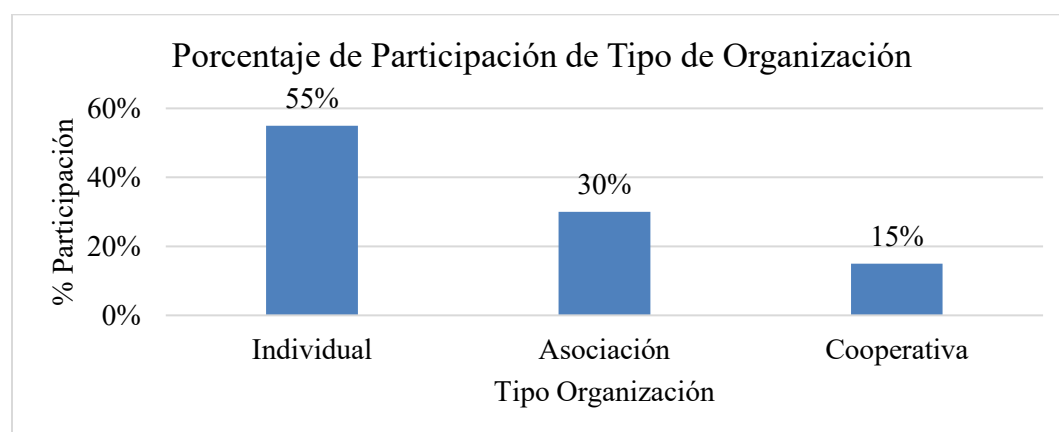
Como se muestra en la figura 8, de los encuestados existe una dominancia de una producción cafetera bajo esquemas individuales, ya que el 55 % de los encuestados manifestó desarrollar su actividad de manera independiente. Este resultado refleja una alta desintegración del sistema productivo, característica común en territorios cafeteros de pequeña escala, donde los productores gestionan de forma autónoma tanto la producción como los procesos de beneficio y manejo de residuos.

Por otra parte, el 30 % de los productores indicó pertenecer a asociaciones, lo cual representa un porcentaje significativo que sugiere la existencia de procesos organizativos orientados al trabajo colectivo, la gestión de proyectos y el acceso a apoyos técnicos o comerciales. Estas formas asociativas constituyen un escenario favorable para la implementación de estrategias de economía circular, dado que facilitan la adopción conjunta de tecnologías, la capacitación y la gestión compartida de subproductos.

Finalmente, solo el 15 % de los encuestados pertenece a cooperativas, lo que indica una menor vinculación a estructuras organizativas más formales y consolidadas. En conjunto, los resultados muestran que, aunque existe una base organizativa importante, aún predomina la producción individual, lo cual representa un desafío para la implementación de modelos integrales de aprovechamiento de residuos, al requerir mayores esfuerzos de articulación, fortalecimiento asociativo y acompañamiento institucional.

### Figura 8

*Porcentaje de Participación de Tipo de Organización*



*Nota.* Gráfica de porcentaje de la participación.

### ***Subproductos Generados***

En la tabla 5 se puede observar que los residuos pulpa y mucílago son los más generados durante el beneficio de café en el distrito el Carmen.

**Tabla 5**

*Tipos de Subproductos Generados*

Tipo de residuo	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
Pulpa	90	90%
Mucílago	85	85%
Cascarilla	28	28%
Borra (ripio)	22	22%
Otros (hojas, ramas, tallos)	18	18%

*Nota.* Las respuestas son de selección múltiple, por lo cual un mismo productor puede generar más de un tipo de residuo. *Fuente.* Autoría Propia

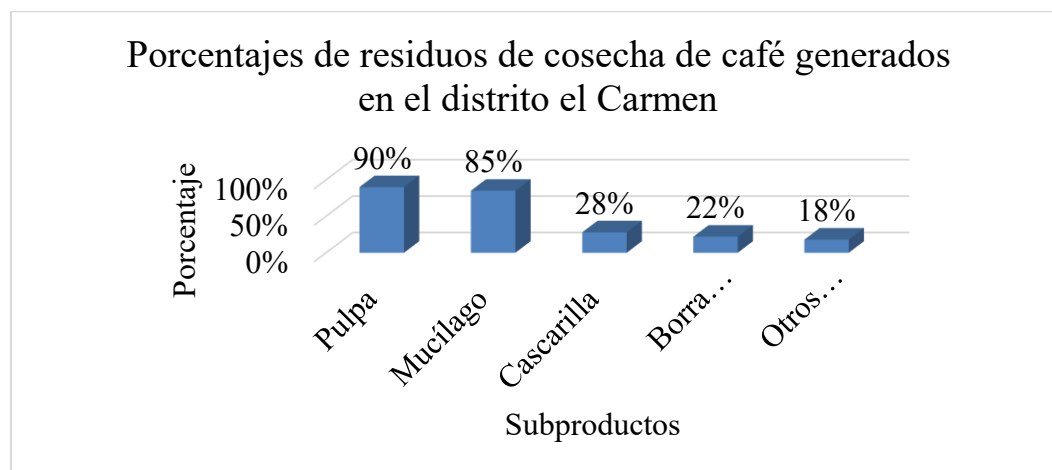
Como se puede observar en la figura 9 los subproductos predominantes en el agronegocio del café corresponden a la pulpa y el mucílago, los cuales fueron reportados por el 90 % y 85 % de los productores encuestados, respectivamente. Estos resultados confirman que ambos residuos constituyen los principales materiales generados durante el proceso de beneficio húmedo del café, debido a que se originan directamente en las etapas de despulpado y fermentación del grano. Su alta presencia en el territorio indica un importante potencial para su aprovechamiento en prácticas de economía circular, como la producción de abonos orgánicos, bioproductos o energías alternativas.

En menor proporción se identificaron otros subproductos, como la cascarilla (28 %) y la borra o ripio (22 %), los cuales se generan principalmente en procesos posteriores del secado o selección del café, por lo que su aparición depende en gran medida del nivel de transformación que realizan los productores. Asimismo, el 18 % de los encuestados reportó la generación de residuos vegetales como hojas, ramas y tallos, asociados principalmente a labores de mantenimiento del cultivo, tales como podas y renovaciones.

El principal desecho generado en los agronegocios de café es la pulpa del café con un 90% de los productores.

### Figura 9

*Porcentajes de Residuos de Cosecha de Café Generados en el Distrito el Carmen.*



*Nota.* La gráfica muestra los porcentajes de residuos generados.

### ***Manejo Actual de los Residuos***

La tabla 6 muestra el manejo actual que los productores entrevistados en el distrito el Carmen dan a los residuos.

**Tabla 6***Manejo Actual de los Residuos*

Práctica actual	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
Los usa como abono orgánico	60	60 %
La desecha sin aprovechamiento	25	25 %
Los vende o entrega a terceros	10	10 %
La quema o elimina	5	5 %
Total	100	100 %

*Nota.* La tabla muestra el manejo de los residuos en práctica.

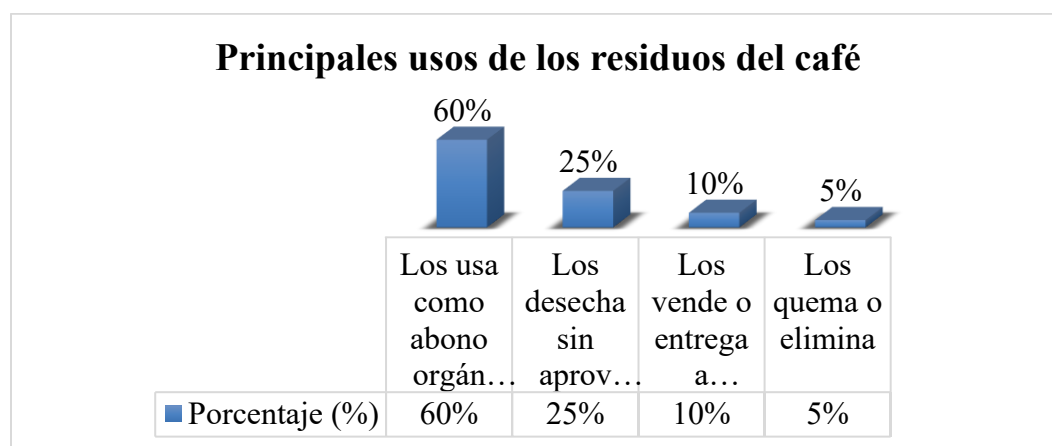
Como se puede observar en la figura 10, el uso más frecuente que los productores dan a los residuos del café es su aprovechamiento como abono orgánico, práctica reportada por el 60 % de los encuestados. Este resultado evidencia una tendencia positiva hacia el reciclaje de materia orgánica dentro de las fincas, lo cual contribuye a mejorar la fertilidad del suelo, reducir costos en la compra de insumos y promover prácticas productivas más sostenibles. Sin embargo, este aprovechamiento se realiza, en muchos casos, de manera empírica y sin procesos técnicos estandarizados, lo que limita su eficiencia y potencial de valorización.

Por otra parte, el 25 % de los productores manifestó desechar los residuos sin ningún tipo de aprovechamiento, lo que representa una proporción significativa y refleja la persistencia de prácticas inadecuadas de manejo. Esta situación puede generar impactos ambientales negativos, especialmente en la contaminación de suelos y fuentes hídricas, además de evidenciar limitaciones en el acceso a capacitación y tecnologías de aprovechamiento.

En menor proporción, el 10 % de los encuestados indicó que vende o entrega los residuos a terceros, lo cual sugiere la existencia de iniciativas incipientes de valorización económica, aunque aún con baja cobertura. Finalmente, el 5 % de los productores reportó prácticas de quema o eliminación, consideradas ambientalmente inadecuadas debido a sus efectos contaminantes y la pérdida de material potencialmente aprovechable

**Figura 10**

*Principales Usos de los Residuos del Café.*



*Nota.* Gráficas donde se visualiza el uso de los residuos en porcentaje.

### ***Conocimiento y Aplicación de Tecnologías***

Como se observa en la tabla 7 se presenta el porcentaje de productores que conocen o aplican alguna tecnología de aprovechamiento.

**Tabla 7***Conocimiento y Aplicación de Tecnologías*

¿Conoce o aplica alguna tecnología de aprovechamiento?	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
Sí	40	40 %
No	60	60 %
Total	100	100 %

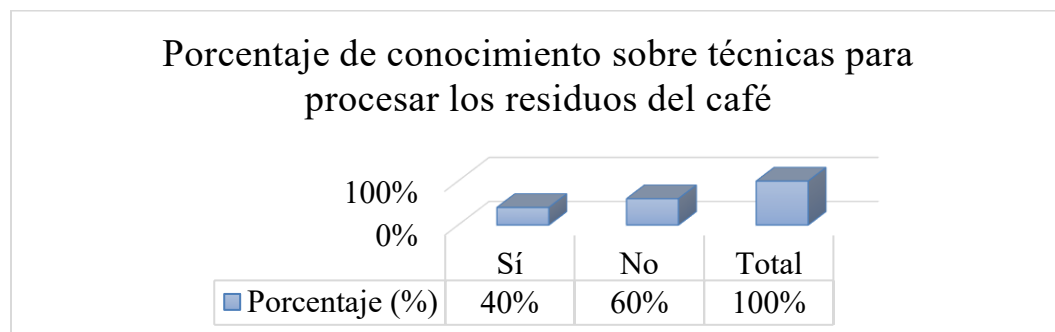
*Nota.* La tabla refleja las respuestas de la pregunta planteada en frecuencia y porcentaje.

Como se observa en figura 11 se puede evidenciar que el nivel de conocimiento y aplicación de tecnologías de aprovechamiento de residuos del café en el territorio aún es limitado. Solo el 40 % de los productores encuestados manifestó conocer o aplicar algún tipo de tecnología orientada a la valorización de subproductos, lo que indica la existencia de experiencias incipientes de adopción tecnológica, principalmente asociadas a prácticas como el compostaje, la lombricultura o el uso de la pulpa como abono orgánico. Este grupo representa un avance importante hacia la transición a modelos productivos más sostenibles, aunque todavía requiere fortalecimiento técnico para optimizar los procesos y ampliar su alcance.

Por otro lado, el 60 % de los productores señaló no conocer ni aplicar tecnologías de aprovechamiento, lo que evidencia una brecha significativa en términos de acceso a información, capacitación y acompañamiento técnico. Esta situación sugiere que la gestión de residuos en la mayoría de los sistemas productivos continúa realizándose de forma tradicional y con bajo nivel de innovación, lo que limita el potencial de generación de valor agregado y el desarrollo de estrategias de economía circular en el sector cafetero.

**Figura 11**

*Porcentaje de Conocimiento Sobre Técnicas para Procesar los Residuos del Café*



*Nota.* Gráfica de porcentaje del conocimiento sobre técnicas.

### ***Costos Anuales de Manejo de Residuos***

En la tabla 8 se presenta el porcentaje de productores que tienen algún costo anual por el manejo de residuos en sus fincas.

**Tabla 8**

*Costos Anuales de Manejo de Residuos*

Rango de gasto anual	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
Menos de \$500.000	50	50 %
\$500.000 – \$1.000.000	35	35 %
Más de \$1.000.000	15	15 %
Total	100	100 %

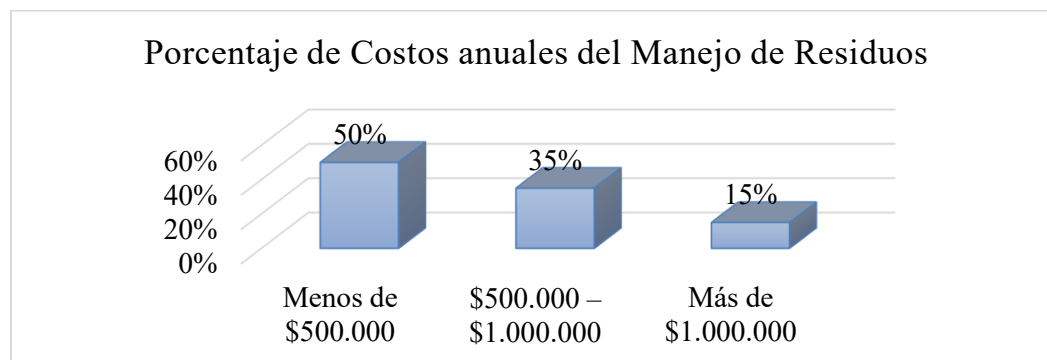
*Nota.* Tabla que evidencia los rangos de gasto anual.

De la figura 12 es posible afirmar que los costos asociados al manejo y disposición de residuos del café representan una carga económica significativa para los productores, especialmente en un contexto caracterizado por sistemas productivos de pequeña escala. El 50 % de los encuestados indicó que gasta menos de \$500.000 anuales en la gestión de residuos, lo que sugiere que la mayoría realiza prácticas de manejo básicas, generalmente de bajo costo y con escasa tecnificación, como el depósito en pilas, la dispersión en el terreno o el uso empírico como abono.

Por su parte, el 35 % de los productores reportó gastos entre \$500.000 y \$1.000.000 al año, lo que refleja la existencia de sistemas de manejo más estructurados, posiblemente asociados a la contratación de mano de obra adicional, transporte o adecuación de espacios para el tratamiento de los residuos. Finalmente, un 15 % manifestó invertir más de \$1.000.000 anuales, evidenciando que para un grupo menor de productores la gestión de subproductos implica costos elevados, posiblemente relacionados con mayores volúmenes de producción o con la adopción de prácticas más tecnificadas.

### Figura 12

*Porcentaje de Costos Anuales del Manejo de Residuos*



*Nota.* Gráfica de porcentaje de costos.

### ***Disposición para Implementar un Modelo de Economía Circular***

En la tabla 9 se puede observar el porcentaje de productores que están dispuestos a implementar un modelo de economía circular en sus fincas.

**Tabla 9**

#### *Disposición para Implementar un Modelo de Economía Circular*

Disposición del productor	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
Sí, dispuesto a implementarlo	90	90 %
No	5	5 %
No sabe / No responde	5	5 %
Total	100	100 %

*Nota.* Tabla donde se visualiza la disposición del productor, frecuencia y porcentaje.

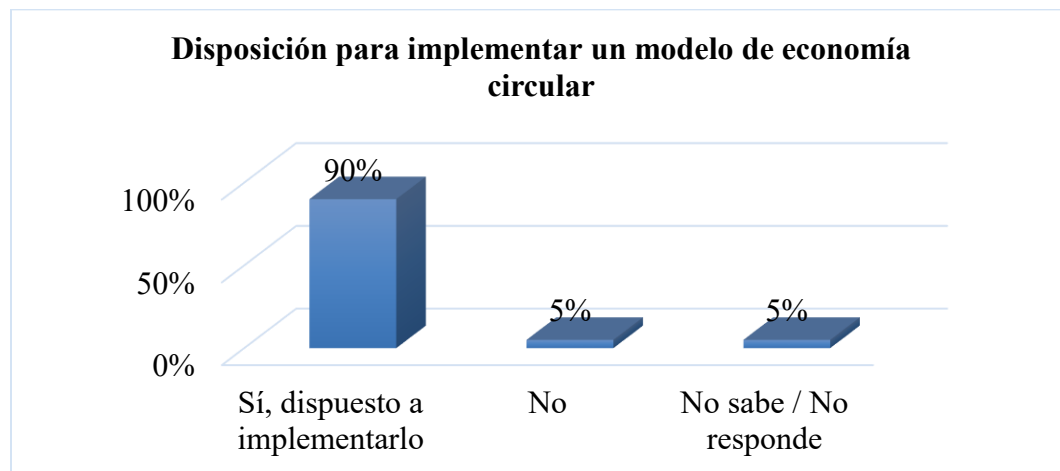
Como se observa en la figura 13, se evidencia una alta disposición por parte de los productores para implementar modelos de aprovechamiento de residuos del café, ya que el 90 % de los encuestados manifestó estar dispuesto a adoptar estas alternativas siempre que contribuyan a la reducción de costos o a la generación de ingresos adicionales. Este resultado refleja una actitud favorable hacia la innovación y la sostenibilidad, así como el reconocimiento del potencial económico y ambiental que representa la valorización de los subproductos del café en los sistemas productivos.

Por otro lado, el 5 % de los productores indicó no estar dispuesto a implementar este tipo de modelos, lo cual puede estar asociado a factores como limitaciones económicas, falta de confianza en nuevas tecnologías, resistencia al cambio o ausencia de información sobre sus

beneficios. Asimismo, un 5 % manifestó no saber o no respondió, lo que sugiere la existencia de incertidumbre o desconocimiento frente a las posibilidades reales de aprovechamiento.

### Figura 13

*Porcentaje de Disposición Para Implementar un Modelo de Economía Circular*



*Nota.* Apoyos Necesarios para Implementar un Modelo de Economía Circular.

En la tabla 10 se puede conocer el porcentaje de productores que requieren algún apoyo para implementar algún modelo de economía circular y se enfoca en diferentes líneas de apoyo.

**Tabla 10***Apoyos Necesarios Para Implementar un Modelo de Economía Circular*

Tipo de apoyo solicitado	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
Capacitación técnica	45	45 %
Financiamiento	30	30 %
Equipos y herramientas	15	15 %
Asesoría técnica continua	10	10 %
Total	100	100 %

*Nota.* Gráfica de apoyos necesarios.

La figura 14 permite evidenciar que el principal apoyo requerido por los productores para implementar estrategias de aprovechamiento de residuos del café corresponde a la capacitación técnica, señalada por el 45 % de los encuestados. Este resultado refleja que la principal barrera no es únicamente económica, sino también el limitado acceso a conocimientos prácticos sobre tecnologías, procesos de transformación y manejo adecuado de los subproductos, lo que pone de manifiesto la necesidad de fortalecer programas de formación y transferencia de tecnología en el territorio.

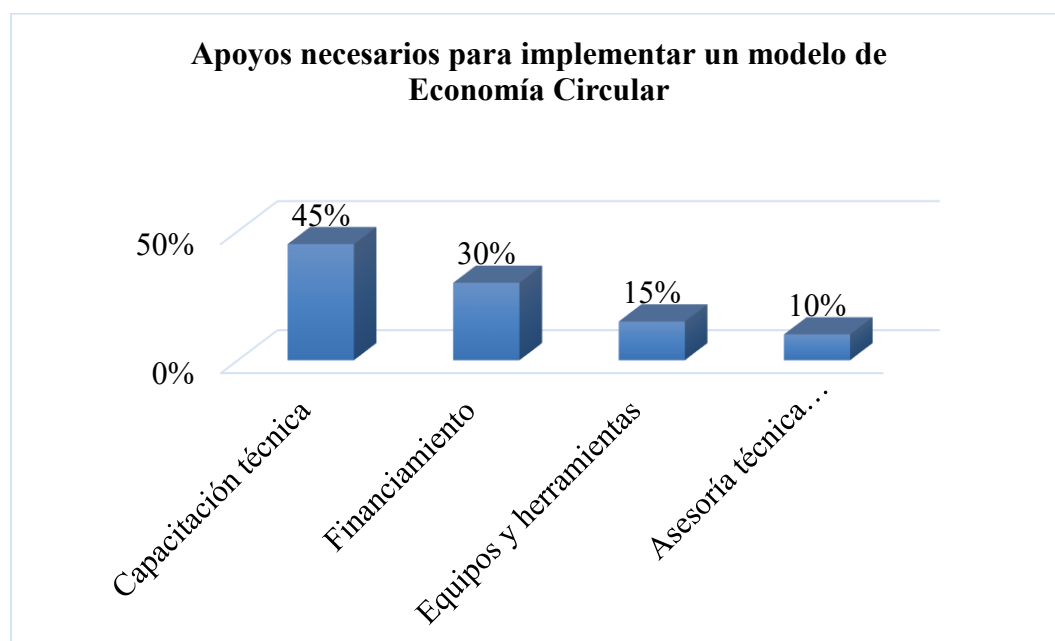
En segundo lugar, el 30 % de los productores manifestó requerir financiamiento, lo cual indica que, aunque existe disposición para adoptar modelos de economía circular, persisten restricciones relacionadas con la inversión inicial necesaria para la adquisición de insumos, adecuación de espacios o implementación de tecnologías de aprovechamiento. Este aspecto

resalta la importancia de diseñar mecanismos de apoyo financiero accesibles y adaptados a las condiciones de la pequeña producción cafetera.

Por su parte, el 15 % de los encuestados señaló la necesidad de equipos y herramientas, lo que evidencia que algunos productores ya cuentan con conocimientos básicos, pero requieren medios físicos para poner en práctica las alternativas de aprovechamiento. Finalmente, el 10 % manifestó la necesidad de asesoría técnica continua, lo que sugiere la importancia del acompañamiento permanente para garantizar la correcta implementación y sostenibilidad de estas iniciativas.

**Figura 14**

*Apoyos Necesarios para Implementar un Modelo de Economía Circular*



*Nota.* Gráficas de los apoyos para implementación.

### *Percepción Sobre la Importancia del Aprovechamiento de Residuos*

En la tabla 11 se puede apreciar el porcentaje de productores que identifican como importante el aprovechamiento de los residuos generados del beneficio de café.

**Tabla 11**

*Percepción Sobre la Importancia del Aprovechamiento de Residuos.*

Calificación (1 a 5)	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
1 - Nada importante	0	0 %
2 - Poco importante	2	2 %
3 - Moderadamente importante	8	8 %
4 – Importante	30	30 %
5 - Muy importante	60	60 %
Total	100	100 %

*Nota.* En la tabla se evidencia la calificación frecuencia y porcentaje del aprovechamiento de residuos.

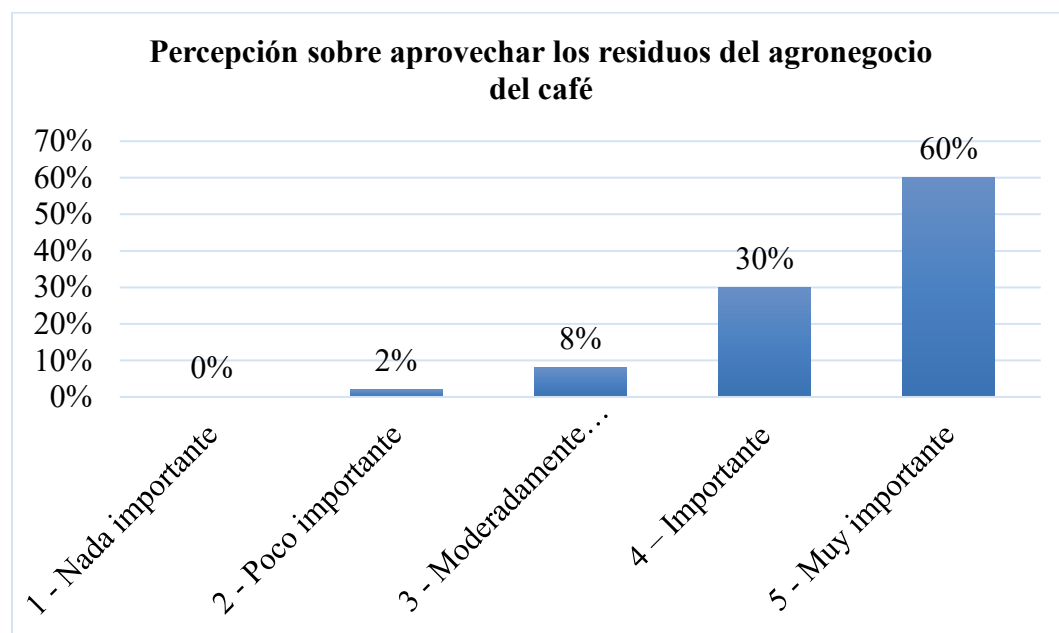
Como se puede observar en la figura 15, los productores otorgan un alto nivel de importancia al aprovechamiento de los residuos del café. El 60 % de los encuestados calificó esta práctica como “muy importante”, mientras que un 30 % la consideró “importante”, lo que significa que el 90 % de los participantes reconoce claramente la relevancia de valorizar los

subproductos generados en el proceso productivo. Este hallazgo refleja una elevada conciencia ambiental y productiva, así como una percepción positiva frente al potencial de estas prácticas para mejorar la sostenibilidad y la eficiencia económica de las fincas cafeteras.

En menor proporción, el 8 % calificó el aprovechamiento como “moderadamente importante”, lo cual puede estar asociado a limitaciones en el conocimiento sobre sus beneficios o a experiencias previas con resultados poco visibles. Solo el 2 % lo consideró “poco importante” y ningún productor lo calificó como “nada importante”, lo que confirma la existencia de una valoración generalizada y favorable hacia estas iniciativas en el territorio.

### Figura 15

*Percepción Sobre Aprovechar los Residuos del Agronegocio del Café.*



*Nota.* Grafica de percepción de los residuos del agronegocio.

### ***Percepción Sobre el Impacto del Modelo en la Comunidad***

En la tabla 12 se puede observar el porcentaje de productores que tienen diferentes percepciones frente al impacto de un modelo de economía circular en la comunidad.

**Tabla 12**

*Percepción Sobre el Impacto del Modelo en la Comunidad.*

¿Cree que un modelo de economía circular podría beneficiar a su comunidad?	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
Sí	92	92 %
No	5	5 %
No sabe	3	3 %
Total	100	100 %

*Nota.* En la tabla se refleja la percepción a través de una pregunta mide la frecuencia y el porcentaje

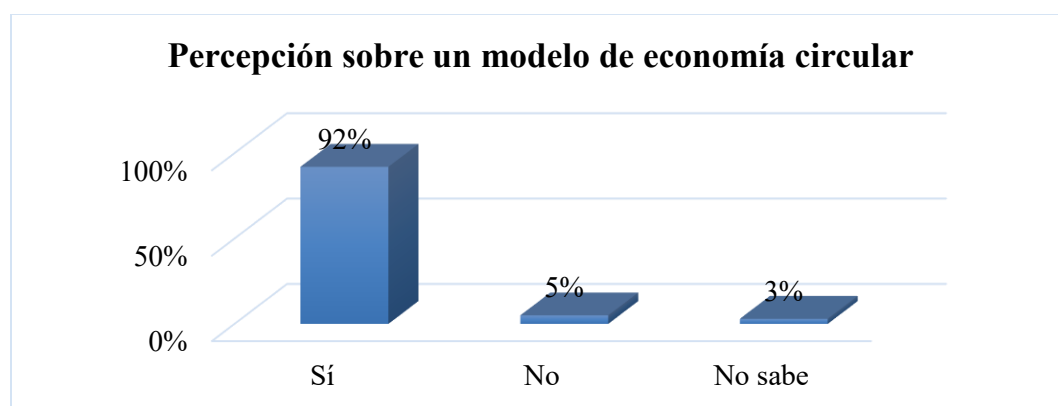
Como se observa en la figura 16, dentro de la población estudiada existe una percepción ampliamente positiva por parte de los productores frente al impacto que podría generar la implementación de un modelo de economía circular en sus comunidades. El 92 % de los encuestados manifestó que considera que este tipo de modelo sí podría beneficiar a su territorio, lo que refleja un alto nivel de aceptación y expectativas favorables en relación con los posibles efectos económicos, sociales y ambientales derivados del aprovechamiento de los residuos del café.

Este resultado sugiere que los productores reconocen el potencial de estas estrategias para mejorar la sostenibilidad productiva, reducir la contaminación y generar nuevas oportunidades de ingresos.

Por otra parte, el 5 % de los encuestados indicó que no cree que un modelo de economía circular pueda beneficiar a su comunidad, lo que podría estar relacionado con experiencias previas limitadas, falta de información o percepciones de dificultad para su implementación. Asimismo, un 3 % manifestó no saber, lo cual evidencia la existencia de cierto grado de desconocimiento sobre el alcance y los beneficios de este enfoque.

**Figura 16**

*Percepción Sobre un Modelo de Economía Circular*



*Nota.* Gráfica de percepción del modelo con respuestas.

En la tabla 13 se puede apreciar la síntesis de los resultados de la caracterización de los principales subproductos del beneficio de café, así como su manejo, y percepciones

**Tabla 13**

*Matriz Consolidada de Resultados de Entrevista a Caficultores – Distrito El Carmen, Oporapa (Huila).*

Categoría	Pregunta	Opciones de respuesta	Porcentaje (%)	Interpretación
1. Tamaño del cultivo	Extensión en hectáreas	<1 ha	45 /	Predominan pequeños y medianos productores; representan el 85 % de la muestra.
		/ 1–3 ha	40 /	
		/ >3 ha	15	
2. Tipo de organización	Forma de trabajo	Individual /	55 /	Mayoría trabaja de forma individual, con baja asociatividad.
		Asociación /	30 /	
		Cooperativa	15	
3. Subproductos generados	Residuos del beneficio del café	Pulpa /	90 /	La pulpa y el mucílago son los residuos más comunes (alta oportunidad para aprovechamiento).
		Mucílago /	85 /	
		Cascarilla /	28 /	
		Borra/	22 /	
4. Manejo actual de residuos	¿Qué hace con los residuos?	Usa como abono	60 /	El 60 % realiza algún aprovechamiento, pero
		/Desecha	25 /	

Categoría	Pregunta	Opciones de respuesta	Porcentaje (%)	Interpretación
		/ Vende	10 /	el 25 % aún los
		/ Quema	5 /	desecha.
		/ Otros	0	
5. Conocimiento de tecnologías	¿Aplica tecnologías como compostaje o biogás?	Sí / No	40 / 60	Solo 40 % aplica tecnologías; se evidencia brecha de conocimiento.
6. Gasto anual en manejo de residuos	Rango de gasto anual	<\$500.000 / \$500.000– \$1.000.000 / >\$1.000.000	50 / 35 / 15	Inversión baja en gestión de residuos, oportunidad de mejora en eficiencia económica.
7. Disposición a implementar modelo circular	¿Adoptaría un modelo si reduce costos o mejora ingresos?	Sí / No / No sabe	90 / 5 / 5	Alta disposición (90 %) a implementar el modelo con apoyo técnico y financiero.

Categoría	Pregunta	Opciones de respuesta	Porcentaje (%)	Interpretación
		Capacitación /	45 /	Los caficultores priorizan capacitación y financiamiento para iniciar el modelo.
8. Apoyos requeridos	Tipo de apoyo solicitado	Financiamiento /	30 /	
		Equipos / Asesoría	15 / 10	
9. Importancia del aprovechamiento	Calificación (1 a 5)	1-2 /	2 /	El 90 % considera importante o muy importante aprovechar los residuos.
		3 /	8 /	
		4 / 5	30 / 60	
10. Percepción del impacto comunitario	¿Cree que el modelo beneficiaría a la comunidad?	Sí /	92 /	92 % percibe beneficios sociales y económicos del modelo circular.
		No /	5 /	
		No sabe	3	

*Nota. Matriz Consolidada de Resultados*

### **Explorar Tecnologías y Procesos Para la Transformación de Estos Residuos en Productos Reutilizables, Tales Como Abonos Orgánicos, Biocombustibles, Compost, Entre Otros.**

En el beneficio húmedo del café se generan diversos subproductos con alta carga orgánica, los cuales, si no se manejan adecuadamente, pueden representar un riesgo significativo para los ecosistemas hídricos. Sin embargo, mediante la implementación de tecnologías

apropiadas, estos residuos pueden ser transformados en recursos valiosos dentro de esquemas de producción sostenible y economía circular.

Ahora, teniendo en cuenta que de la población abordada solo el 45 % de los productores afirmó conocer o aplicar alguna tecnología de aprovechamiento, principalmente compostaje y lumbricultura, y el 55 % restante manifestó no tener formación ni herramientas para transformar los residuos. Este resultado respalda la necesidad de fortalecer la capacitación técnica y la transferencia tecnológica, factores que fueron señalados por los propios caficultores como los principales apoyos requeridos.

Por lo que fue necesario complementar la exploración de tecnologías y procesos que se puede realizar dentro de la población objetivo como lo es el Carmen de Oporapa.

### ***Despulpado en Seco y Manejo de Pulpa sin Agua***

El despulpado en seco, acompañado del transporte de la pulpa sin uso de agua hacia fosas techadas o sistemas de almacenamiento controlado, constituye la principal medida preventiva para la reducción de la contaminación en el beneficio húmedo del café. Esta tecnología permite evitar que aproximadamente el 72% de la carga contaminante potencial de los subproductos del café llegue a las fuentes hídricas (Rodríguez-Valencia, N., Zambrano Franco, D. A., & Ramírez, C. A. 2013)

La efectividad de esta práctica radica en que la pulpa concentra la mayor proporción de materia orgánica generada durante el beneficio. Cuando no se maneja adecuadamente, puede producir lixiviados altamente contaminantes; sin embargo, al separarse y almacenarse correctamente, se conserva su potencial para ser aprovechada en procesos de compostaje,

producción de abonos orgánicos, generación de biocombustibles o como materia prima en sistemas de economía circular.

### ***Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio (SMTA)***

El mucílago del café representa el 28% restante de la carga contaminante generada en el beneficio húmedo. Para su manejo, se han desarrollado los Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio (SMTA), diseñados especialmente para pequeñas y medianas fincas cafeteras. Estos sistemas funcionan mediante procesos biológicos de fermentación anaerobia, en los cuales microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Gracias a este proceso, los SMTA logran remover aproximadamente el 80% de la contaminación orgánica presente en las aguas residuales del café (Rodríguez-Valencia, et al., 2013)

Además, esta tecnología permite el lavado del grano utilizando el sistema de tanque tina, con consumos reducidos de agua que oscilan entre 4 y 5 litros por kilogramo de café pergamino seco, lo cual representa un importante ahorro hídrico en comparación con métodos tradicionales. Para mejorar su eficiencia ambiental, los SMTA suelen complementarse con sistemas de postratamiento, como humedales artificiales con macrófitas acuáticas, que permiten incrementar la remoción de contaminantes hasta valores cercanos al 95%, reduciendo significativamente el impacto sobre los ecosistemas acuáticos.

### ***Modelo Integral de Aprovechamiento de Subproductos del Café***

El modelo integral de manejo de subproductos del café propone un aprovechamiento secuencial de los residuos, transformándolos en diferentes productos de valor agregado. En este sistema, la pulpa se utiliza inicialmente para la producción de bioetanol, generando energía renovable. Posteriormente, los residuos sólidos derivados de este proceso pueden emplearse

como sustrato para el cultivo de hongos comestibles. Una vez finalizada esta etapa, los residuos restantes pueden destinarse a la producción de abonos orgánicos mediante compostaje o lombricultura (Rodríguez-Valencia, et al., 2013).

Asimismo, los líquidos residuales generados en la producción de bioetanol, conocidos como vinazas, pueden ser tratados mediante digestión anaerobia para producir biogás, el cual puede utilizarse como fuente de energía dentro de la misma finca. Este modelo permite obtener de manera secuencial energía renovable, alimentos, insumos agrícolas y productos para alimentación animal, optimizando el uso de los recursos y reduciendo la generación de residuos.

### ***Aprovechamiento del Cisco de Café y Residuos Lignocelulósicos***

Los subproductos generados en la etapa de trilla, como el cisco de café, poseen un alto contenido energético y pueden utilizarse como combustible en procesos de secado mecánico del grano, reduciendo el uso de combustibles convencionales. De igual manera, los tallos provenientes de la renovación de cafetales pueden emplearse como sustrato para el cultivo de hongos comestibles y medicinales. Tras este proceso, los residuos mantienen su valor energético, por lo que pueden seguir utilizándose como combustible (Rodríguez-Valencia, et al., 2013).

### ***Tecnología Becolsub***

Cenicafé ha liderado procesos de innovación tecnológica con las tecnologías Becolsub (Beneficio Ecológico del Café bajo Sistemas de Bajo Consumo de Agua), que permiten reducir significativamente el consumo de agua y facilitar el manejo de subproductos.

La tecnología Becolsub (Beneficio Ecológico del Café bajo Sistemas de Bajo Consumo de Agua), desarrollada por Cenicafé, constituye un sistema integral orientado a reducir el consumo de agua y la contaminación generada durante el proceso de beneficio húmedo del café.

Este modelo permite despulpar el café en cereza sin usar agua, aprovechando la humedad natural del fruto, y eliminar el mucílago mediante mecanismos mecánicos, lo que disminuye significativamente el uso del recurso hídrico, alcanzando consumos entre 0,7 y 1 litro por kilogramo de café pergamino seco, en contraste con los métodos tradicionales que pueden emplear hasta 40 litros.

Además, la tecnología facilita el manejo conjunto de los subproductos, ya que la pulpa y el mucílago se mezclan mediante sistemas de transporte como tornillos sinfin o cintas, lo que mejora su aprovechamiento y control ambiental.

Como resultado de esta integración de subproductos se generan lixiviados con alta concentración de materia orgánica, especialmente en fincas cafeteras de mayor escala que utilizan desmucilaginado mecánico. Para el manejo adecuado de estos residuos líquidos se incorporan los Sistemas de Tratamiento Primario para Lixiviados del Becolsub (STLB), los cuales forman parte complementaria del mismo enfoque tecnológico. Estos sistemas permiten realizar una separación inicial de sólidos y reducir la carga orgánica de las aguas residuales.

Lo que facilita su posterior tratamiento mediante sistemas secundarios como los SMTA y, en etapas finales, humedales artificiales, conformando así una cadena de tratamiento que garantiza altos niveles de descontaminación. En conjunto, la tecnología Becolsub y los STLB no solo contribuyen a disminuir más del 90 % de la contaminación potencial de los vertimientos, sino que también representan una alternativa viable para pequeños, medianos y grandes caficultores que buscan procesos más sostenibles, especialmente en regiones con limitada disponibilidad de agua y con exigencias crecientes en materia ambiental (Rodríguez-Valencia, et al., 2013).

### ***Tecnología Ecomil***

Por su parte la tecnología Ecomil es una tecnología más reciente desarrollada también por Cenicafé / FNC para el lavado ecológico del café, con un enfoque aún mayor en la conservación del agua y eliminación total de vertimientos contaminantes. Su funcionamiento radica en utilizar la fermentación natural del mucílago, o la aplicación de enzimas pectinolíticas, para degradar el mucílago antes del lavado mecánico. El café ya degradado se lava mecánicamente con un bajo volumen de agua. Está disponible en tres modelos según capacidad: 500 kg/h, 1.500 kg/h y 3.000 kg/h, adaptándose a distintos tamaños de beneficiaderos (Oliveros-Tascón, et al., 2022).

Como beneficios se resalta un muy bajo consumo de agua: entre 0,3 y 0,6 litros por kilogramo de CPS, mucho menor que con Becolsub y métodos tradicionales. Además, las aguas resultantes se reutilizan en la misma finca o se manejan adecuadamente, eliminando la descarga contaminante. Permite producir café de alta calidad física y sensorial, incluso cafés especiales, de forma sostenible. Como limitantes los equipos Ecomill® pueden ser más costosos inicialmente que tecnologías más simples, lo que puede constituir una barrera para caficultores con menos recursos.

Su operación y mantenimiento requiere cierta capacitación técnica, especialmente en el manejo de fermentación y reutilización de aguas. Puede necesitar infraestructura adicional (tanques de fermentación, manejo de agua reutilizada), lo cual puede ser un reto en fincas muy pequeñas sin instalaciones adecuadas (Oliveros-Tascón, et al., 2022).

### ***Filtros Verdes***

La tecnología de filtros verdes es un sistema natural de tratamiento de aguas residuales del café que utiliza procesos físicos, biológicos y de evapotranspiración para reducir la

contaminación. Su funcionamiento se basa en conducir el agua residual previamente tratada hacia un área cultivada con vegetación, generalmente pasto vetiver, donde se retiene, infiltra y evapotranspira.

El sistema está compuesto por varias unidades: una trampa de pulpa para retener sólidos, un tratamiento primario que reduce la carga orgánica, un sistema de distribución del agua residual y un área impermeabilizada sembrada con vegetación. Esta zona actúa como el “filtro vivo”, ya que el suelo y las raíces capturan nutrientes y materia orgánica, mientras las plantas facilitan la evaporación del agua.

Además, el filtro verde cuenta con una cubierta plástica tipo invernadero que evita el ingreso de agua lluvia y mejora la evapotranspiración, así como un sistema de drenaje que permite recircular el agua no retenida hasta su aprovechamiento total.

Su eficiencia depende del mantenimiento periódico, que incluye poda del vetiver, limpieza de tuberías, manejo de lodos y control de aguas lluvias, garantizando así el adecuado tratamiento y disposición ambientalmente segura de las aguas residuales del beneficio del café

### ***Referentes Nacionales e Internacionales en el Aprovechamiento de Subproductos del Café***

Además de las tecnologías de tratamiento y valorización descritas, existen experiencias organizativas y empresariales que evidencian el potencial económico, ambiental y social del aprovechamiento de los subproductos del café. Estos casos constituyen referentes importantes para comprender la viabilidad de modelos de economía circular aplicados al sector cafetero.

**Experiencia Nacional Asociación de Mujeres Cafeteras del Cauca.** A nivel nacional, un referente destacado es la Asociación de Mujeres Cafeteras del Cauca, organización que ha desarrollado estrategias de aprovechamiento de subproductos del café con un enfoque de género

y sostenibilidad. Esta asociación ha impulsado la transformación de residuos como la cáscara y la pulpa en productos con valor agregado, incluyendo infusiones, abonos orgánicos mediante compostaje y productos de cosmética natural.

Su principal aporte radica en demostrar que el aprovechamiento de subproductos no solo contribuye a la reducción del impacto ambiental, sino que también puede generar nuevas oportunidades económicas y fortalecer procesos de empoderamiento femenino en comunidades rurales. Sin embargo, este modelo requiere altos niveles de cohesión social, capacidades organizativas sólidas y apoyo institucional continuo para garantizar su sostenibilidad.

**Experiencia Internacional Café Bueno.** A nivel internacional, se destaca el caso de la empresa Café Bueno, una iniciativa empresarial que importa subproductos del café colombiano, especialmente la cáscara, para transformarlos en ingredientes destinados a la industria cosmética y nutracéutica.

Este modelo constituye un ejemplo de bioeconomía circular a escala global, evidenciando que los residuos del café pueden alcanzar altos niveles de valorización si cumplen estándares de calidad, inocuidad y trazabilidad. No obstante, su replicabilidad en contextos rurales es limitada, debido a las exigencias de infraestructura, certificación y capacidad logística que requiere el acceso a mercados internacionales.

**Experiencias de Cooperativas en Honduras y Perú.** En países como Honduras y Perú, diversas cooperativas cafetaleras han implementado sistemas comunitarios de manejo de residuos del café, enfocados en la producción de compost y biogás a partir del mucílago y las aguas mieles.

Estos modelos han demostrado importantes beneficios ambientales, como la reducción de la contaminación hídrica y la disminución del uso de fertilizantes químicos, así como ventajas económicas derivadas de la generación de energía alternativa. Sin embargo, su implementación requiere inversión inicial, capacitación técnica y un acompañamiento continuo para asegurar su sostenibilidad a largo plazo.

Por ello, la adopción de estos modelos debe partir de un análisis previo de las capacidades locales, incluyendo aspectos organizativos, técnicos y financieros. Asimismo, es fundamental promover procesos participativos de co-creación, garantizar el acompañamiento continuo por parte de instituciones académicas, entidades públicas o cooperación internacional, y adaptar las soluciones a la escala productiva, cultura y dinámica socioeconómica del territorio.

### ***Consideraciones Prácticas Según el Tamaño del Productor***

La implementación de estas tecnologías varía según el tamaño de la unidad productiva. Los pequeños cafeteros con menos de media hectárea, que representan aproximadamente el 64% de los productores, pueden aprovechar la pulpa principalmente para la producción de abonos orgánicos y utilizar sistemas SMTA para el tratamiento de aguas residuales. Los productores medianos tienen la posibilidad de integrar el cultivo de hongos comestibles como alternativa de aprovechamiento, mientras que los grandes productores pueden implementar modelos integrales que incluyen la producción de bioetanol, biogás, abonos orgánicos y alimentos derivados de los subproductos.

En términos ambientales, es importante resaltar que las aguas residuales del beneficio del café presentan características altamente contaminantes, con niveles de carga orgánica entre 60 y

240 veces superiores a los de las aguas residuales domésticas, lo que hace indispensable la implementación de sistemas adecuados de tratamiento.

### ***Consideraciones Para la Adaptación al Contexto Local***

A partir del análisis de las tecnologías disponibles y de las experiencias nacionales e internacionales revisadas, se definió como alternativa más pertinente para el contexto del área de estudio el aprovechamiento de la pulpa de café para la producción de abono orgánico, integrando en este proceso el manejo de las aguas lixiviadas generadas durante su descomposición.

Esta elección se fundamenta principalmente en las características socioeconómicas y productivas de la población cafetera intervenida. De acuerdo con la caracterización realizada, los productores presentan una estructura predominantemente de pequeña y mediana escala, con un tamaño promedio de cultivo cercano a las dos hectáreas y un total de 181,1 hectáreas en el área de estudio. Este tipo de estructura productiva limita la viabilidad de tecnologías más complejas o de alta inversión, como los sistemas de producción de bioetanol, plantas industriales de transformación o modelos de exportación de subproductos.

En términos ambientales, el diagnóstico evidenció una generación significativa de residuos orgánicos y líquidos asociados al beneficio húmedo del café. El muestreo realizado permitió estimar una producción total de aproximadamente 884,98 toneladas de pulpa y un uso de agua cercano a 18.110 m<sup>3</sup> durante el proceso de beneficio. Estas cifras reflejan no solo la magnitud del potencial contaminante, sino también la disponibilidad de materia prima para procesos de valorización orgánica a nivel local.

La selección del compostaje de la pulpa como tecnología prioritaria responde a su alta pertinencia técnica y social. Se trata de un proceso biológico de bajo costo, fácil implementación

y adaptable a sistemas productivos familiares, que permite transformar un residuo altamente contaminante en un insumo agrícola útil para mejorar la fertilidad del suelo, reducir la dependencia de fertilizantes químicos y fortalecer prácticas agroecológicas.

Adicionalmente, la integración de las aguas lixiviadas dentro del proceso de descomposición de la pulpa representa una estrategia ambientalmente adecuada para el manejo del componente líquido del beneficio. Estas aguas, caracterizadas por su alta carga orgánica y acidez, pueden ser reincorporadas controladamente al proceso de compostaje, donde sus nutrientes contribuyen a acelerar la degradación biológica del material y a mejorar la calidad del abono final. Esta alternativa reduce significativamente el riesgo de contaminación hídrica y elimina la necesidad de sistemas de tratamiento más costosos o complejos.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, esta opción tecnológica se alinea con los principios de economía circular, al permitir el cierre de ciclos de nutrientes dentro de la finca cafetera. Asimismo, su implementación requiere niveles moderados de capacitación técnica y puede ser adoptada progresivamente por los productores, lo que facilita su apropiación social y su sostenibilidad en el tiempo.

Finalmente, la elección de esta alternativa también responde a criterios de viabilidad territorial. A diferencia de modelos observados en experiencias internacionales o en grandes organizaciones productivas, la transformación de la pulpa en abono orgánico constituye una solución realista y replicable para comunidades cafeteras con recursos limitados, permitiendo generar beneficios ambientales, económicos y productivos sin depender de infraestructura industrial ni de mercados externos especializados.

En este sentido, el aprovechamiento de la pulpa y las aguas lixiviadas mediante procesos de compostaje se configura como la opción tecnológica más adecuada para el contexto local, al equilibrar eficiencia ambiental, viabilidad económica, facilidad de implementación y potencial de adopción por parte de los productores.

**Proponer un Plan de Implementación para la Adopción de un Modelo de Economía Circular por los Caficultores de la Región, Considerando Sus Capacidades Técnicas y Recursos Disponibles, Aportando a los Objetivo de Desarrollo Sostenibles (ODS)**

***Diseño del Modelo de Economía Circular***

El modelo de economía circular propuesto para las fincas cafeteras del distrito El Carmen, en el municipio de Oporapa, se fundamenta en las tecnologías vistas anteriormente, con enfoque de despulpado en seco y manejo de pulpa sin agua, así como con los procesos de compostaje y lombricultura. Esto se debe a que el esquema planteado prioriza la separación, almacenamiento y transformación de la pulpa y los lixiviados en abonos orgánicos que posteriormente se reincorporan al cultivo, permitiendo cerrar el ciclo de nutrientes dentro de la finca.

El modelo propuesto a continuación también guarda relación con el enfoque del aprovechamiento integral de subproductos, ya que promueve el uso secuencial de los residuos; sin embargo, se diferencia por su orientación hacia tecnologías de bajo costo, fáciles de implementar y acordes con las condiciones de los pequeños y medianos productores del territorio

De esta manera el modelo de economía circular propuesto integra las diferentes etapas del sistema productivo del café, con el propósito de optimizar el uso de recursos, reducir los impactos ambientales y generar valor agregado a partir de los subproductos del proceso de

beneficio. Este enfoque busca transformar el esquema productivo tradicional, lineal y basado en la disposición final de residuos, hacia un sistema cíclico en el que los materiales orgánicos retornan al proceso productivo como insumos.

El ciclo inicia con la etapa de fertilización del cultivo, donde se incorporan nutrientes al suelo para fortalecer el desarrollo de las plantas desde la fase de levante hasta la etapa productiva. Posteriormente, se desarrolla la producción del café cereza en los lotes cafeteros, seguida del proceso de beneficio, en el cual el grano recolectado es transformado mediante actividades de despulpado, fermentación, lavado, secado y clasificación, obteniéndose como producto principal el café pergamino seco destinado a la comercialización.

De manera paralela, durante el beneficio se generan subproductos orgánicos como pulpa y aguas mieles (mucílago), los cuales son recolectados y sometidos a procesos de transformación para su aprovechamiento. Estos residuos pueden ser destinados a la producción de abonos orgánicos a partir de la pulpa para ser tratada en composteras y las aguas mieles pueden ser utilizadas en la tecnología de filtros verdes para la producción de lodos orgánicos y biosama vegetal (pasto vetiver), que finalmente pueden ser utilizados también en la compostera, permitiendo la reincorporación de la pulpa y las aguas mieles al sistema productivo mediante su uso en la nutrición de los cultivos.

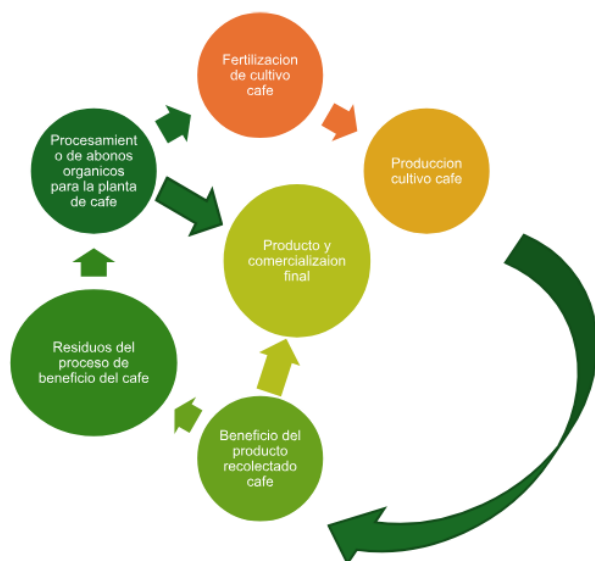
De esta forma, el modelo cierra el ciclo productivo al convertir los residuos en insumos, promoviendo la sostenibilidad ambiental, la reducción de costos y el fortalecimiento de la economía local.

Como se puede observar en la figura 17 se desarrolla la estructura de manera detallada de la propuesta de implementación del modelo.

**Figura 17**

*Ciclo de Economía Circular Propuesto y Sistema de Producción Para Distrito El Carmen*

*Oporapa, Huila*



*Nota.* Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2020)

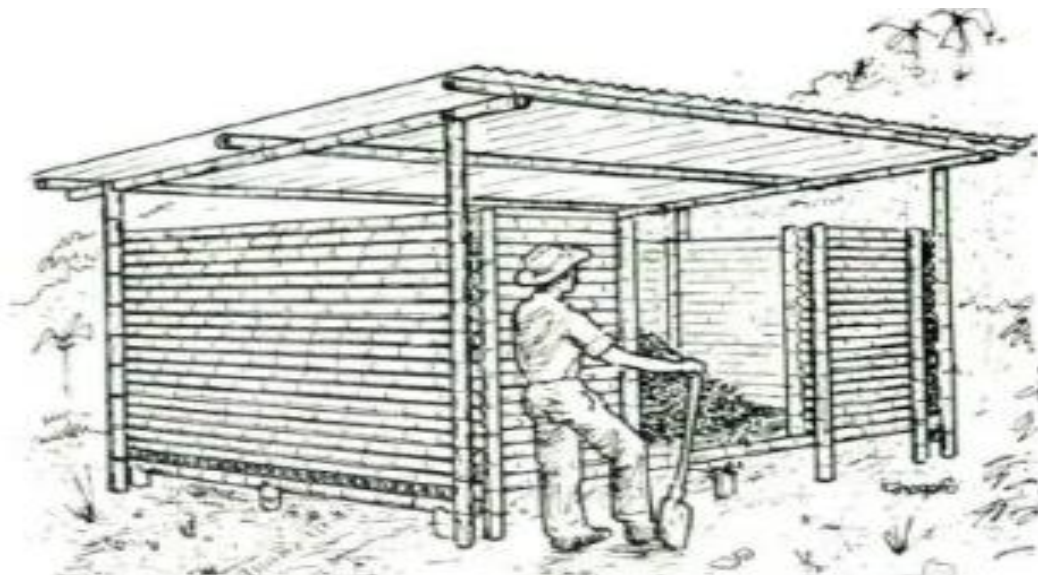
### ***Formulación del Plan de Implementación***

Posteriormente, se elaboró un plan operativo que definió las estrategias necesarias para la adopción del modelo, incluyendo actividades técnicas requeridas para el aprovechamiento de subproductos y Cronograma de implementación por etapas

**Fosa de Compost.** En la figura 18 se puede observar el modelo de la fosa compost propuesta para el modelo de economía circular.

**Figura 18**

*Ilustración de Fosa de Compost*



*Nota.* Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2020)

***Especificaciones de las Dimensiones Recomendadas.*** En el marco de la definición de las actividades técnicas requeridas para el aprovechamiento de subproductos del café y su cronograma de implementación por etapas, se establecieron especificaciones técnicas para el diseño y funcionamiento adecuado de la infraestructura de compostaje, con el fin de garantizar la eficiencia del proceso biológico y la calidad del abono producido. Estas condiciones estructurales son fundamentales, ya que inciden directamente en la aireación, el control de humedad y la estabilidad del material orgánico durante las diferentes fases del compostaje.

En primer lugar, se determinó un área de trabajo de 6 m<sup>2</sup> para la construcción de la fosa, dimensión que permite una adecuada circulación del aire dentro de la pila y evita procesos de compactación que puedan generar condiciones anaeróbicas. Se considera que una altura excesiva

del material, superior a 1,5 metros, puede impedir la oxigenación del centro de la pila, afectando negativamente la descomposición y reduciendo la eficiencia del proceso.

Asimismo, se estableció que el piso de la compostera debe contar con una pendiente del 2% orientada hacia un punto de drenaje, donde se instala una tubería de PVC de dos pulgadas para la recolección de lixiviados en un tanque externo. Esta especificación técnica es clave para prevenir la acumulación de humedad excesiva en la base del compost, evitando procesos de pudrición y permitiendo el aprovechamiento adecuado de los líquidos generados durante la descomposición.

**Condiciones Operativas.** Se definió una altura del techo de 2,50 metros en la parte superior y 2,10 metros en la parte inferior, lo cual facilita la movilidad del operario y el uso de herramientas como palas durante las labores de volteo y manejo del material. Este diseño contribuye a mejorar la ergonomía del trabajo y a optimizar la eficiencia de las actividades técnicas programadas en el cronograma.

Finalmente, la infraestructura debe ser diseñada con una capacidad de carga inicial aproximada de 2.666 kilogramos de material fresco, compuesto principalmente por pulpa de café y otros residuos orgánicos. Durante el proceso de descomposición y pérdida de humedad, este volumen se reduce progresivamente hasta obtener cerca de 1.600 kilogramos de abono orgánico estabilizado, lo que evidencia la eficiencia del sistema para transformar residuos en un insumo agrícola de alto valor.

En la tabla 14 se puede apreciar las actividades y cronograma de implementación por etapas para la implementación de la fosa. El plan de implementación presentado se presenta una estructuración técnica del proceso de aprovechamiento de subproductos del café mediante

compostaje, organizada en cuatro fases biológicas sucesivas que garantizan la transformación adecuada de la materia orgánica.

La fase mesófila, con una duración inicial de una a dos semanas, representa el inicio de la descomposición, donde la actividad microbiana genera un aumento progresivo de la temperatura, indicando que el proceso biológico se activa correctamente. Esta etapa es clave porque define la calidad del arranque del compostaje mediante actividades como el armado de la pila, el picado del material y la inoculación con microorganismos.

Posteriormente, la fase termófila constituye el momento crítico del proceso, tanto desde el punto de vista técnico como sanitario. Durante este periodo, que puede extenderse entre cuatro y seis semanas, se alcanzan temperaturas elevadas entre 60 y 70 °C, lo que permite la eliminación de patógenos, semillas de malezas y agentes contaminantes. El manejo técnico intensivo, especialmente los volteos frecuentes para garantizar oxigenación, refleja que esta etapa exige mayor esfuerzo operativo y supervisión, siendo determinante para la eficiencia del sistema y la calidad del producto final.

En la fase de enfriamiento se evidencia la estabilización progresiva del material orgánico, caracterizada por la reducción de la temperatura y del volumen de la pila, así como la aparición de microorganismos benéficos como los hongos descomponedores. Esta etapa marca la transición hacia un compost más estable, donde disminuye la intensidad del manejo técnico, lo que reduce la demanda de mano de obra y permite consolidar la estructura física del abono.

Finalmente, la fase de maduración representa la estabilización total del proceso biológico, en la que el compost adquiere características óptimas como olor a tierra de bosque, textura homogénea y humedad controlada. La duración total del proceso, estimada entre 12 y 16

semanas, permite obtener aproximadamente 1.600 kg de abono orgánico estable, lo que evidencia la viabilidad técnica del sistema para el aprovechamiento de residuos cafeteros dentro de un modelo de economía circular.

**Tabla 14**

*Actividades y Cronograma de Implementación por Etapas*

Fase	Duración	Actividad Principal	Estado del Material
Fase 1: Mesófila	1 - 2 semanas	Armado de la pila en la fosa, picado e inoculación con microorganismos.	Comienza la descomposición; sube la temperatura a 40°C.
Fase 2: Termófila	4 - 6 semanas	Fase Crítica: Volteos frecuentes (cada 3-4 días) para oxigenar.	Temperatura alcanza 60-70°C (elimina patógenos y semillas).
Fase 3: Enfriamiento	3 - 4 semanas	Los volteos se reducen a 1 por semana. El volumen empieza a bajar.	La temperatura desciende a 30-35°C; aparecen hongos benéficos.
Fase 4: Maduración	4 semanas	Estabilización total. No requiere volteos, solo control de humedad.	El abono huele a tierra de bosque y queda listo para tamizar.
TOTAL	12 - 16 Semanas	Producto Final: 1.600 kg de Abono Estable	Humedad final controlada al 60%.

*Nota.* Federación Nacional de Cafeteros de Colombia

**Recursos Físicos y Financieros Necesarios.** A continuación, se analiza la estructura de costos necesarios para la instalación y operación de la compostera, evidenciando una inversión total de \$3.717.346, que integra tanto infraestructura física como actividades operativas del proceso.

En la tabla 15 se observa los costos que corresponden a los costos para la instalación de la compostera por un valor de \$960.000

**Tabla 15**

*Estructura Costos Para Instalación de Compostera*

Inversión inicial construcción de fosa				
Ítem	Unidad	Dimensión/Cantidad	Valor Unitario	Subtotal
Excavación manual	m3	6 m3 (3x2x1m)	35.000	210.000
Mano de obra civil	Global	Construcción completa	750.000	750.000
Total				\$960.000

*Nota.* Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

La tabla 16 permite ver los costos necesarios para las herramientas para la construcción de la compostera por un valor total de \$1.475.000

**Tabla 16***Herramientas Para Construcción de Compostera*

Herramientas para construcción de Compostera				
Ítem	Unidad	Dimensión/Cantidad	Valor Unitario	Subtotal
Piso concreto (3000 PSI)	M2	6 m2 (0.10 m)	65.000	390.000
Muro bloque de cemento	und.	120 (10x20x40cm)	3.500	420.000
Postes madera inmunizada	Unid.	4 (Altura 2,5 m)	60.000	240.000
Teja de zinc / ondulada	m2	10 m2 (Incluye traslapo)	38.000	380.000
Tuberia drenaje (Lixiviados)	Metro	3m (PVC 2”)	15.000	45.000
Total				1.475.000

*Nota.* Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

La tabla 17 permite observar los costos operativos anuales para mantener actica o en funcionamiento la compostera por un valor total de \$1.928.467

**Tabla 17***Costos Operativos Anuales de compostera*

Costos Operativos Anuales				
Ítem	Unidad	Dimensión/Cantidad	Valor Unitario	Subtotal
Recolección y Picado	Jornal	3 jornales (Inicio)	65.000	195.000
Armado de Pilas e Inoculación	Jornal	2 jornales	65.000	130.000
Volteos Técnicos (Oxigenación)	Jornal	8 jornales (2 por mes)	65.000	520.000
Control Humedad y T°	Global	Monitoreo diario (3 meses)	242.345	242.345
Tamizado y Empaque	Jornal	3 jornales (Final)	65.000	195.000
Aplicación	Global	Global	443.866	443.866
Transporte	Global	Global	202.256,00	202.256,00
Total				1.928.467

*Nota.* Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

**Roles y Responsabilidades de los Actores de la Cadena de Valor.** El proceso de implementación del sistema de compostaje en finca cafetera implica la participación de diversos actores dentro de la cadena de valor, cuyas responsabilidades se distribuyen de acuerdo con las etapas técnicas, operativas y de gestión identificadas anteriormente. En primer lugar, el

productor caficultor se constituye como el actor principal, ya que es responsable de la generación de los residuos orgánicos (pulpa y mucílago), la disponibilidad del espacio para la infraestructura y la toma de decisiones sobre la adopción del modelo. Su rol es estratégico, dado que lidera la implementación, aporta mano de obra familiar y garantiza el seguimiento del proceso biológico durante las diferentes fases del compostaje.

En segundo lugar, los trabajadores o jornaleros cumplen un rol operativo fundamental, ya que son los encargados de ejecutar las actividades técnicas descritas en el cronograma, tales como la recolección y picado del material, el armado de las pilas, los volteos para la oxigenación y las labores de tamizado y empaque del compost.

Otro actor relevante dentro de la cadena es el maestro y/o proveedor de insumos y materiales, quien suministra los elementos necesarios y/o contribuye con la construcción de la infraestructura. Este actor facilita la disponibilidad de recursos técnicos que permiten garantizar la eficiencia del sistema y su adecuada operación.

Asimismo, el extensionista rural desempeña un rol clave en la transferencia de conocimiento. Es responsable de brindar capacitación sobre manejo del compostaje, control de variables como humedad y temperatura, y seguimiento técnico para asegurar la correcta adopción de la tecnología. Su participación fortalece las capacidades locales y reduce los riesgos de fallas en el proceso.

Finalmente, dentro de la cadena de valor de la pulpa descompuesta también se identifica el usuario final del compost, que es el mismo productor. Este actor se beneficia directamente del sistema al disponer de un abono orgánico de bajo costo que contribuye a mejorar la fertilidad del

suelo, reducir la dependencia de fertilizantes químicos y cerrar el ciclo de aprovechamiento de residuos, consolidando así un modelo de economía circular

**Estrategias de Capacitación y Fortalecimiento de Capacidades Locales.** La implementación del modelo no solo depende de la inversión económica, sino también del fortalecimiento de capacidades locales que garanticen su sostenibilidad en el tiempo. En este sentido, las estrategias de capacitación deben orientarse tanto al desarrollo de habilidades técnicas como organizativas dentro de la comunidad cafetera.

En primer lugar, se requiere una estrategia de formación técnica en manejo del compostaje, enfocada en el reconocimiento de las fases biológicas del proceso, el control de variables críticas como temperatura, humedad y oxigenación, y la correcta aplicación de prácticas como el picado del material, la inoculación de microorganismos y los volteos programados. Este tipo de capacitación permite reducir errores operativos y asegurar la calidad del abono final, además de fortalecer el conocimiento práctico de los productores sobre el aprovechamiento de residuos orgánicos.

En segundo lugar, es fundamental promover procesos de capacitación orientados a enseñar el correcto uso y conservación de la compostera, el manejo de drenajes de lixiviados y las condiciones de almacenamiento del material orgánico. Estas acciones contribuyen a prolongar la vida útil de la infraestructura y a prevenir riesgos ambientales asociados a un manejo inadecuado de los residuos.

Otra estrategia clave es el fortalecimiento de capacidades organizativas y asociativas, mediante la formación en trabajo colaborativo, planificación de actividades, distribución de responsabilidades y gestión comunitaria del proceso. Esto resulta especialmente importante

cuando el modelo se implementa a nivel de grupos de productores, ya que permite optimizar el uso de mano de obra, compartir costos y facilitar la continuidad del sistema en el tiempo.

Adicionalmente, se recomienda desarrollar procesos de capacitación en educación ambiental y economía circular, con el fin de sensibilizar a los productores sobre la importancia del aprovechamiento de subproductos del café, la reducción de la contaminación generada por el beneficio húmedo y los beneficios agronómicos del uso de abonos orgánicos. Este tipo de formación fortalece el cambio de prácticas productivas y promueve una cultura de sostenibilidad en las fincas cafeteras.

Finalmente, una estrategia complementaria consiste en la implementación de esquemas de aprendizaje práctico o “aprender haciendo”, mediante parcelas demostrativas, acompañamiento técnico en campo y seguimiento periódico del proceso. Este enfoque facilita la apropiación del conocimiento, ya que los productores adquieren experiencia directa en la aplicación de la tecnología y pueden replicarla en sus propias unidades productivas.

**Tecnología de Filtros Verdes.** Se propone para el manejo, tratamiento y cero descargas de las aguas residuales de la finca cafetera. La figura 19 permite observar la implementación de la tecnología de filtros verdes propuesto para el modelo de economía circular.

Figura 19

*Ilustración de Implementación Filtros Verdes*

Nota. Cenicafe (2023)

**Especificaciones de las Dimensiones.** El filtro verde se compone de varios elementos integrados que permiten el tratamiento eficiente de las aguas residuales. La trampa de pulpa constituye la primera barrera del sistema. Su función es retener sólidos como granos y pulpa del café, evitando taponamientos en las tuberías. Se sugiere que tenga un volumen de 0,5 a 1 m<sup>3</sup>, dimensionado según el volumen de pulpa generado en la finca. Esta unidad protege la infraestructura y asegura un flujo constante hacia las etapas posteriores.

La unidad de tratamiento primario tiene como objetivo reducir la carga orgánica del agua antes de su llegada al área de vegetación, previniendo obstrucciones en el sistema de conducción. Su tamaño dependerá del caudal de agua residual y se recomienda que sea proporcional al volumen de la trampa de pulpa para garantizar un pretratamiento efectivo. La unidad de aplicación recibe el agua pretratada y la distribuye uniformemente sobre la superficie del filtro

verde, permitiendo que toda el área de vegetación reciba el flujo necesario para su correcto funcionamiento.

El área de vegetación constituye el núcleo del filtro. Está impermeabilizada con geomembrana de aproximadamente 10 m<sup>2</sup> (por ejemplo, 2 m de ancho por 5 m de largo) y cubierta con pasto vetiver, sembrado con una distancia de 20 a 25 cm entre plantines para lograr una cobertura densa. Esta zona retiene sedimentos, facilita la evapotranspiración del agua residual y contribuye significativamente a la depuración del efluente. La cobertura plástica tipo invernadero, con dimensiones ligeramente mayores a la del área de vegetación (aproximadamente 2,2 m x 5,2 m y altura de 1,5–2 m), protege el sistema de la lluvia y del sol intenso, favoreciendo la eficiencia del pasto vetiver y evitando la dilución del agua residual.

El sistema de aplicación, conformado por tuberías elevadas de  $\frac{3}{4}$  a 1 pulgada de diámetro con orificios cada 20–25 cm, asegura la distribución uniforme del agua residual sobre toda el área de vegetación. Finalmente, la unidad de drenaje recoge el agua que no ha sido retenida por el pasto vetiver y la recircula hacia el área cultivada, asegurando un aprovechamiento completo del recurso y permitiendo que el sistema funcione de manera continua y sostenible

***Recursos Físicos y Financieros.*** La tabla 17 presenta un desglose detallado de los costos asociados a la implementación de un filtro verde, incluyendo tanto los insumos materiales como la mano de obra y el mantenimiento anual. Este análisis permite evaluar el costo total aproximado del primer año y, por ende, la viabilidad económica de implementar esta tecnología en una finca cafetera.

**Tabla 18***Estructura Costos (Insumos/Operación), para Instalación de Filtro Verde*

Concepto	Cantidad / Frecuencia	Costo unitario (COP)	Subtotal (COP)	Observaciones
Geomembrana 10 m <sup>2</sup>	1	\$ 150.000	\$ 150.000	Impermeabilización
Pasto vetiver (plantines)	50	\$ 2.000	\$ 100.000	Cobertura filtro
Cobertura plástica (invernadero)	1	\$ 200.000	\$ 200.000	Protección lluvia
Tuberías y sistema de aplicación	10 m	\$ 100.000	\$ 100.000	Distribución aguas
Trampa de pulpa / unidad primaria	1	\$ 150.000	\$ 150.000	Evita obstrucciones
Subtotal insumos			\$ 700.000	
Mano de obra instalación	2 personas/2 días	\$50.000/día	\$ 200.000	Mano de obra inicial
Mantenimiento anual	1 persona/12 meses	\$10.000/mes	\$ 120.000	Poda, limpieza, manejo lodos
Costo total primer año			\$ 1.020.000	Aproximado.

*Nota. Cenicafe (2023)*

### ***Roles y Responsabilidades de los Actores***

**Caficultores.** Son los principales responsables de la operación y mantenimiento del filtro verde. Su rol incluye la supervisión diaria del sistema, la realización de la poda periódica del pasto vetiver, la limpieza de lodos y residuos, y la verificación de que las tuberías y trampas funcionen correctamente. Además, deben asegurar que la cobertura plástica y la geomembrana se mantengan en buen estado para prolongar la vida útil del filtro. Su responsabilidad es garantizar que el filtro cumpla su función de tratamiento de aguas residuales y minimización de impactos ambientales en la finca.

**Mano de Obra Técnica o Instaladores.** Se encargan de la instalación inicial de la infraestructura, que incluye la colocación de la geomembrana, el pasto vetiver, las tuberías y las trampas de pulpa. Su responsabilidad es asegurar que todos los elementos estén correctamente montados y que el sistema funcione de manera eficiente desde el inicio. Esta etapa es crítica porque una instalación adecuada asegura la durabilidad y efectividad del filtro verde.

**Asesores o Técnicos.** Pueden apoyar en la capacitación de los productores, orientándolos en el manejo del filtro, el control de lodos y la optimización del sistema para maximizar su eficiencia en la filtración y tratamiento de aguas residuales. Su responsabilidad es transferir conocimiento técnico que permita que los caficultores mantengan la tecnología de manera autónoma y sostenible.

La tabla 19 permite identificar las actividades de mantenimiento para la tecnología Filtros Verdes.

**Tabla 19***Actividades de Mantenimiento Tecnología Filtros Verdes*

Actividad de mantenimiento	Frecuencia	Propósito principal	Acciones clave
Poda del pasto vetiver	Bimensual o trimestral	Controlar crecimiento, mejorar aireación y favorecer evapotranspiración	Cortar a 50 cm del suelo y retirar hojas secas
Limpieza de tubería de riego	Bimensual, trimestral o cuando haya obstrucciones	Evitar taponamientos y asegurar distribución del agua	Destapar orificios con alambre y lavar con agua a presión
Descarga de lodos (tratamiento primario)	Bimensual o trimestral	Evitar acumulación y obstrucción del sistema	Extraer lodos y llevarlos a procesador de pulpa o lecho de secado
Manejo de lodos (unidad de aplicación)	Según acumulación	Mantener funcionamiento del filtro	Incorporar al suelo o trasladar a secado/procesador
Canales de esorrentía	Permanente / revisión periódica	Evitar ingreso de aguas lluvias	Construir y mantener canales de desviación
Limpieza de cubierta plástica	Ocasional	Mantener fotosíntesis y productividad del vetiver	Retirar suciedad y residuos de la cubierta

*Nota.* (cenicafe 2023)

### ***Articulación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)***

Finalmente, se realizó un análisis de correspondencia entre el modelo propuesto y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, identificando su contribución principalmente en aspectos relacionados con producción sostenible, gestión ambiental, innovación rural y fortalecimiento socioeconómico del sector cafetero.

De esta manera la propuesta del modelo de economía circular para el distrito el Carmen aporta y se alinea con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, (ONU, 2026)

**ODS 12.** Producción y consumo responsables, al promover la valorización de residuos como insumos útiles en nuevas cadenas productivas. (ONU, 2026)

**ODS 9.** Industria, innovación e infraestructura, mediante el impulso a tecnologías y modelos de transformación sostenible de subproductos agroindustriales. (ONU, 2026)

**ODS 13.** Acción por el clima, al reducir la contaminación de fuentes hídricas y las emisiones derivadas de un manejo inadecuado de residuos. (ONU, 2026)

**ODS 8.** Trabajo decente y crecimiento económico, generando nuevas oportunidades de empleo e ingresos mediante el desarrollo de productos derivados del café. (ONU, 2026)

**ODS 17.** Alianzas para lograr los objetivos, al promover la cooperación entre actores públicos, privados, comunitarios y académicos para la innovación y sostenibilidad del sector cafetero. (ONU, 2026)

## **Analizar el Impacto Económico, Social y Ambiental del Modelo Propuesto**

### ***Impacto Económico***

El presente apartado analiza la viabilidad económica del modelo de economía circular planteado para el aprovechamiento de subproductos del beneficio del café en el distrito El Carmen, municipio de Oporapa. Para ello se evaluó el manejo actual de la fertilización convencional por el productor con el uso de productos comerciales de síntesis química frente al escenario de la fertilización empleando la economía circular que integra el aprovechamiento de subproductos en su forma de pulpa descompuesta, en combinación con la fertilización química, para lo que primeramente se tuvo en cuenta lo siguiente.

**Estimación del Potencial de Residuos Generados.** Para evaluar la viabilidad económica del modelo de economía circular propuesto, se partió de la estimación del volumen de subproductos generados durante el beneficio del café en el municipio de Oporapa y el distrito El Carmen, con base en información secundaria sobre el área cafetera del municipio y cálculos propios, en Oporapa se registran 3.045 hectáreas sembradas en café y una producción anual de 2.468,58 toneladas de café pergamino seco (CPS). Sin embargo, el café no se cosecha en esta forma, sino como café cereza (el fruto fresco).

Para obtener una tonelada de CPS se requieren aproximadamente 4,89 toneladas de café cereza, debido a que durante el proceso de beneficio se elimina la pulpa, el mucílago y la humedad del grano. Esto significa que la producción municipal equivale aproximadamente a 12.071 toneladas de café cereza ( $2.468,58 \times 4,89$ ).

De acuerdo con estudios técnicos de Cenicafé (2021), por cada tonelada de café cereza procesada se generan cerca de 400 kilogramos de pulpa, ya que esta representa aproximadamente

el 40 % del peso del fruto fresco. En consecuencia, si en el municipio se producen alrededor de 12.071 toneladas de café cereza al año, también se estarían generando aproximadamente 4.828,4 toneladas de pulpa como subproducto del proceso de beneficio.

Particularmente, en el distrito El Carmen, que concentra aproximadamente 743 caficultores con un promedio de 1,9 hectáreas por productor, esto representa cerca de 1.411 hectáreas cultivadas en café (FNC, 2025). Por lo que la participación del distrito El Carmen en la producción cafetera municipal se estimó a partir de la proporción de su área cultivada en café (1.411 ha) frente al total reportado para el municipio de Oporapa (3.045 ha), lo que corresponde al 46,34 %.

Bajo el supuesto de rendimientos homogéneos en el territorio, este porcentaje se aplicó a la producción municipal de 2.468,58 toneladas de café pergamino seco (CPS), obteniéndose una producción estimada de 1.143,9 toneladas CPS para el distrito. Al aplicar el factor de conversión de 4,89, esta producción equivale a 5.593,7 toneladas de café cereza, que generarían aproximadamente 2.23,5 toneladas de pulpa/ha, considerando una producción de 400 kg de pulpa por tonelada de café cereza.

Por su parte, (Cenicafe. 2008), en su avance técnico 370 estima que el beneficio convencional utiliza hasta 40 litros de agua por kilogramo de café pergamino seco. Bajo este escenario, para una producción de 2.468 toneladas de CPS en el municipio de Oporapa, se requerirían aproximadamente 98.720.000 litros de agua, equivalentes a 98.720 m<sup>3</sup>. Siendo así, para el distrito El Carmen, cuya producción estimada es de 1.143,9 toneladas de café pergamino seco (CPS), el volumen de agua utilizado en el beneficio convencional sería aproximadamente de

45.756.000 litros, equivalentes a 45.756 m<sup>3</sup>, gran parte del recurso que termina siendo vertido sin tratamiento adecuado.

En la tabla 20 se puede observar los residuos de cosechas cafeteras aproximadas en Oporapa y el distrito el Carmen de manera detallada.

**Tabla 20**

*Residuos de Cosechas Cafeteras Aproximadas en Oporapa*

Población	Producción Café (Ha)	Pulpa De Café (Ton/Ha)	Agua Utilizada (método convencional), m <sup>3</sup>
Oporapa	3045,1	4.828,4	98.720
Distrito El Carmen	1.411	2.23,5	45.756

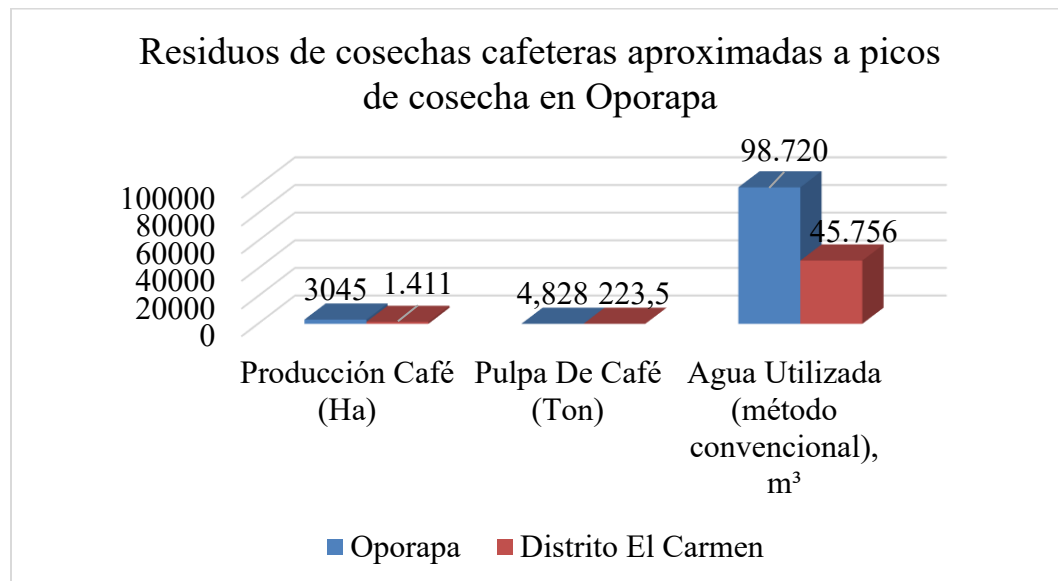
*Nota.* TerriData, (2024).

La figura 21 permite observar gráficamente la distribución de producción de los residuos generados en el municipio de Oporapa y en el Carmen. Como las 3.045 hectáreas del municipio de Oporapa producen cerca de 4.828 toneladas de pulpa, y por ende 4.828,4 toneladas de pulpa fresca por hectárea, entonces estos al perder el 60% de humedad se obtienen 2,897 toneladas de pulpa descompuesta por ha y para el distrito el Carmen sería de 1 ton de pulpa descompuesta/ha.

Estos valores evidencian un alto potencial de aprovechamiento de residuos, tanto sólidos como líquidos, lo que justifica la implementación de estrategias de economía circular en el sistema productivo cafetero.

**Figura 20**

*Residuos de Cosechas Cafeteras en Oporapa y Distrito El Carmen.*



*Nota.* Gráficas de residuos de las cosechas.

**Opciones y Costos de Fertilización Según Avance Técnico 549 Cenicafe.** Con el fin de evaluar el impacto económico del uso de la pulpa como fertilizante, se compararon tres alternativas de nutrición del cultivo; fertilización química, fertilización orgánica, fertilización orgánico-mineral, sin embargo, el plan de fertilización puede variar por los costos de su implementación.

En la figura 22 se puede observar la comparación de costos de fertilización por hectárea y año por Cenicafe para el periodo 2022, donde si un productor de café fertiliza solo con fertilizantes de procedencia química tendría un costo de \$5.678.000. Por su parte la opción de fertilizar con pulpa descompuesta tendría un valor total de 9.027.000 a diferencia de combinar la opción química con la orgánica (pulpa descompuesta), el costo es de \$5.121.000. Por lo que se

puede concluir que la última opción tiene un mayor beneficio, justificando el uso y adecuación de composteras de pulpa de café para complementar el uso de fertilizantes químicos y mejorar las producciones.

## Figura 21

### *Avance Técnico 549 Fertilización Organomineral.*

Tabla 6. Costos de la fertilización por hectárea y año con diferentes opciones de fertilización en las dosis y condiciones presentadas en la Tabla 5.

Fertilizantes	Costo de los fertilizantes	Costo de transporte	Costo de aplicación	Costo total/ha
(a) 23-4-20-4(MgO)	\$5.330.000	\$87.000 (2 jornales)	\$261.000 (6 jornales)	\$5.678.000
(b) Pulpa de café descompuesta	\$7.200.000	\$870.000 (20 jornales)	\$957.000 (22 jornales)	\$9.027.000
(c) 23-4-20-4(MgO) + pulpa descompuesta	\$4.381.500	\$217.500 (5 jornales)	\$522.000 (12 jornales)	\$ 5.121.000

\*Precio del jornal: \$43.500. Precio por saco de 50 kg: Fertilizante de síntesis química \$205.000, Fertilizante a partir de pulpa de café descompuesta, obtenido en la finca \$12.000. Precios al año 2022.

*Nota.* (Cenicafé, 2021)

En la figura 23 se muestra los aportes en nutrientes para cada opción de fertilización, donde se justifica el uso de la fertilización orgánico-mineral teniendo en cuenta que para suplir las necesidades nutricionales para una hectárea de café al año se requieren de 975 kilogramos de pulpa de café descompuesta más 1.600 kilogramos de fertilizante químico 23-4-20-4(MgO), además de que esta opción presenta el menor costo total por hectárea, evidenciando su mayor eficiencia económica. Esta combinación estaría aportando 240 kilos de nitrógeno, 41 kilos de fosforo, 210 kilos de potasio, 41 kilos de magnesio y 32 kilos de azufre.

## Figura 22

### *Aportes de Nutrientes con Diferentes Opciones de Fertilizantes*

Tabla 5. Aportes de nutrientes con diferentes opciones de fertilización.

Fertilizantes	Cantidad requerida de fertilizante (kg ha <sup>-1</sup> )	Aporte de nutrientes (kg ha <sup>-1</sup> )				
		N	P	K	Mg	S
(a) 23-4-20-4(MgO)	1.300	300	52	261	52	39
(b) Pulpa de café descompuesta*	30.000	300	41	276	41	48
(c) 23-4-20-4(MgO) + pulpa de café descompuesta*	975 + 1.600	240	41	210	41	32

Nota. Cenicafe, (2021)

**Observaciones.** Teniendo en cuenta los anteriores datos es importante que en el proceso de economía circular los caficultores reutilicen desecho de pulpa de café para integrarlos como una parte de fertilizantes al cultivo de café.

Según datos analizados anteriormente, estos representan una base para el periodo 2025. En la tabla 21 se puede evidenciar diferencias significativas en los costos asociados a las tres opciones de fertilización por hectárea. El fertilizante químico 23-4-20-4 (MgO) muestra un costo total de \$4.670.434, determinado principalmente por el valor del insumo, mientras que los costos de transporte y aplicación son relativamente bajos debido a su alta concentración de nutrientes, lo que reduce las cantidades requeridas y facilita su manejo en campo.

En contraste, la fertilización basada exclusivamente en pulpa de café descompuesta presenta el costo total más elevado, alcanzando \$16.401.000 por hectárea. Este incremento no se debe al valor del material en sí, sino a los altos costos operativos asociados, especialmente el transporte y la aplicación. La pulpa requiere grandes volúmenes para suplir las necesidades nutricionales del cultivo, lo que implica mayor número de jornales, esfuerzo físico y logística,

convirtiéndose en el principal factor que limita su viabilidad económica cuando se utiliza como única fuente de fertilización.

Por su parte, la fertilización combinada de fertilizante químico y pulpa descompuesta registra el menor costo total (\$4.363.468 por hectárea), evidenciando una mayor eficiencia económica. Esta alternativa permite reducir la cantidad de fertilizante químico utilizado y, al mismo tiempo, disminuir los costos operativos asociados al uso exclusivo de la pulpa. De esta manera, se logra un equilibrio entre el aprovechamiento de residuos orgánicos disponibles en la finca y la eficiencia en la nutrición del cultivo. Con la fertilización orgánico-mineral es posible lograr similares o mejores producciones que al emplear fertilizantes de síntesis química al 100% de la recomendación según el análisis de suelos.

### Tabla 21

*Tabla Comparativa Costos Fertilización 2026*

Fertilizantes	Costo de fertilizantes	Costo transporte	Costo aplicación	Costo total /ha
23-4-20-4(MgO)	\$4,030,434	\$160.000 (2 jornales)	\$480.000 (6 jornales)	\$4.670.434
Pulpa de café descompuesta.	\$13.041.000	\$1.600.000 (20 jornales)	\$ 1.760.000 (22 jornales)	\$ 16.401.000
23-4-20-4 (Mgo) + pulpa descompuesta	\$3.717.345,5	\$ 202,256 (5 jornales)	\$ 443.866 (12 jornales)	\$4.363.468

*Nota.* Precio del jornal: \$80.000 pesos. Precio saco 50 kg de fertilizante de síntesis química \$154.500. Fertilizante a partir de pulpa de café descompuesta obtenido en la finca \$21,735. *Fuente.* Autoría Propia

**Evaluación Financiera del Modelo.** Para determinar la rentabilidad del sistema de aprovechamiento de la pulpa de café se evaluaron los tres escenarios de fertilización anteriormente mencionados en la tabla 19:

- fertilización convencional química
- fertilización con pulpa de café descompuesta
- fertilización orgánico-mineral.

El análisis se realizó mediante los indicadores financieros Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Relación Costo-Beneficio.

Considerando que el tamaño promedio del cultivo en el distrito El Carmen es de 1,9 hectáreas por productor, se compararon los costos de fertilización por hectárea en cada escenario. Los resultados evidenciaron que el escenario A (fertilización mineral), presenta un costo anual de \$4.670.434 por hectárea, mientras que el escenario B (fertilización con pulpa descompuesta), alcanza \$16.401.000, lo que lo convierte en una alternativa económicamente inviable. Por su parte, el escenario C (fertilización combinada), mostró un costo anual de \$4.363.468 por hectárea, generando un ahorro de \$306.966 por hectárea al año comparándolo con el escenario A.

Debido a que la implementación del sistema requiere una inversión inicial en infraestructura de compostaje, se procedió a evaluar financieramente el escenario C mediante un

flujo de caja proyectado a siete años, periodo que corresponde a una vida útil media de la compostera ya que puede durar hasta 10 años.

**Análisis del Flujo de Caja.** La inversión inicial del sistema estuvo compuesta por la construcción de la compostera (\$960.000) y la adquisición de materiales e infraestructura (\$1.475.000), para un total de \$2.435.000. El beneficio anual se estimó a partir del ahorro en fertilización, equivalente a \$306.966 por hectárea, que para el tamaño promedio de finca en el distrito el Carmen es de 1,9 ha, esto representa un ahorro anual de \$583.235 por hectárea.

En la tabla 21 se puede observar la proyección del flujo de caja el cual evidenció que el proyecto alcanza un VAN positivo de \$226.742, una TIR del 15% y una relación costo-beneficio de 1,09, lo que indica que por cada peso invertido se generan \$1,09 en beneficios.

Los resultados financieros muestran que el sistema de fertilización orgánico-mineral es económicamente viable en el mediano plazo, dado que supera la tasa de descuento establecida del 12% y genera beneficios superiores a los costos de inversión. La ampliación del periodo de evaluación a 7 años permite evidenciar la rentabilidad real del sistema, considerando la vida útil de la infraestructura y la naturaleza progresiva de los beneficios derivados del modelo de economía circular para las unidades productivas del distrito El Carmen.

Uno de los principales impactos económicos del modelo de economía circular es la disminución sostenida de los costos de fertilización del cultivo de café. Al incorporar la pulpa descompuesta como insumo complementario, los caficultores reducen su dependencia de fertilizantes de síntesis química, los cuales representan uno de los rubros más altos dentro de los costos de producción.

El modelo transforma un subproducto sin valor comercial como la pulpa del café, en un insumo productivo, lo que representa un claro proceso de valorización económica de residuos.

**Tabla 22**

*Flujo de Caja para Fertilización Orgánico-Mineral*

Flujo de Caja para fertilización orgánico-mineral	
Año	Flujo
0	-2.435.000
1	583.235
2	583.235
3	583.235
4	583.235
5	583.235
6	583.235
7	583.235
VAN	\$ 226.742,54
TIR	15%
C/B	1,09

*Nota.* La tabla refleja el año y el flujo de caja.

**Impacto Económico del Manejo de Aguas Mielles Mediante Filtros Verdes.** El modelo de economía circular propuesto no solo contempla el aprovechamiento de los residuos sólidos del beneficio del café, sino también el manejo sostenible de los subproductos líquidos, particularmente las aguas mieles, las cuales actualmente son vertidas directamente al suelo en el

distrito El Carmen, generando impactos ambientales y económicos negativos. Sin embargo, esta tecnología no se ha integrado en la evaluación financiera realizada anteriormente, debido a que hace parte de otro componente del sistema y además esta tecnología no genera un flujo monetario anual.

De esta manera la implementación de sistemas de filtros verdes representa una alternativa de bajo costo para el tratamiento de estas aguas residuales, permitiendo reducir significativamente la carga contaminante antes de su disposición final. Aunque este sistema no genera ingresos monetarios directos para el productor, sí produce beneficios económicos indirectos importantes.

En primer lugar, el uso de filtros verdes evita costos futuros asociados a la degradación del suelo, pérdida de fertilidad y disminución de la productividad agrícola. Asimismo, permite reducir el riesgo de sanciones ambientales derivadas de vertimientos sin tratamiento, las cuales pueden representar costos elevados para los caficultores.

Adicionalmente, esta tecnología implica una inversión considerablemente menor frente a otras alternativas de tratamiento, como biodigestores o plantas convencionales, lo que la convierte en una opción económicamente accesible para pequeños productores.

En este sentido, el sistema de filtros verdes constituye un complemento del modelo de economía circular, generando impactos económicos positivos de carácter preventivo, al reducir costos potenciales y contribuir a la sostenibilidad productiva del sistema cafetero.

### ***Impacto Social***

Los impactos sociales presentados corresponden a escenarios proyectados basados en la información diagnóstica recolectada en el distrito El Carmen. Dado que el modelo aún no ha sido

implementado, los resultados se han interpretado como proyecciones hipotéticas construidas mediante análisis porcentual y estimación estadística simple.

**Número Potencial de Familias Beneficiadas.** Se estima que en el distrito El Carmen existen 743 familias caficultoras con un tamaño promedio de finca de 1,9 hectáreas. La implementación del modelo permitiría beneficiar directamente a la totalidad de estas familias, al promover el aprovechamiento de subproductos generados en sus propias fincas, reduciendo costos en fertilización y mejorando la sostenibilidad económica de las unidades productivas.

Adicionalmente, el impacto social se amplía al núcleo familiar, dado que la reducción de gastos en insumos productivos contribuye indirectamente a mejorar la estabilidad económica del hogar, fortaleciendo la seguridad financiera y reduciendo la vulnerabilidad frente a la volatilidad de precios de los fertilizantes químicos.

**Nivel Estimado de Adopción Tecnológica.** El diagnóstico indicó que actualmente el 40% de los caficultores del distrito no cuentan con sistemas estructurados para el manejo de pulpa de café ni para el tratamiento de aguas residuales del beneficio debido a que del 100% de los productores solo el 60% utiliza los subproductos de café para elaborar abono orgánico. La introducción de composteras y filtros verdes representa la adopción de tecnologías de bajo costo, fáciles de implementar y adaptadas a las condiciones locales.

Sin embargo, Se proyecta un alto nivel de adopción tecnológica, dado que aproximadamente el 90 % mostró disposición a implementar el modelo de aprovechamiento de residuos. La integración de estas prácticas en las labores cotidianas y los beneficios económicos directos estimados aumentan la probabilidad de adopción sostenida en el tiempo.

**Fortalecimiento Organizativo.** Los resultados del diagnóstico previo (paso 1), evidencian que el 45 % de los productores se encuentran vinculados a alguna organización colectiva (30 % en asociaciones y 15 % en cooperativas). Estas formas organizativas facilitan la implementación de estrategias conjuntas de aprovechamiento de subproductos del café, el acceso a asistencia técnica y la gestión compartida de tecnologías ambientales, elementos fundamentales dentro del enfoque circular.

No obstante, el predominio de la producción individual (55 %) revela un nivel significativo de fragmentación productiva que puede limitar la implementación eficiente de esquemas integrales de valorización de residuos, debido a economías de escala reducidas y menores capacidades técnicas y financieras. En este sentido, los resultados no solo describen la estructura organizativa actual, sino que permiten afirmar que la adopción del modelo de economía circular en el distrito dependerá en gran medida del fortalecimiento asociativo y de estrategias de articulación territorial que permitan integrar a los productores individuales en dinámicas colectivas.

En consecuencia, los datos muestran que existe una base organizativa incipiente pero insuficiente, lo cual indica que el modelo de economía circular es viable, pero requiere un proceso progresivo de consolidación organizativa para garantizar su implementación efectiva y sostenible.

### ***Impacto Ambiental***

Los impactos ambientales presentados corresponden a escenarios proyectados, contruidos a partir de datos diagnósticos del distrito El Carmen y estimaciones técnicas basadas en literatura científica y cálculos indirectos. Dado que el modelo aún no ha sido implementado,

los resultados deben fueron interpretados como proyecciones hipotéticas de reducción de residuos y carga contaminante.

**Reducción Estimada de Residuos Orgánicos sin Tratamiento Especialmente Pulpa (ton/año).** En relación con los residuos sólidos del beneficio del café, se estimó que en el distrito El Carmen se generan aproximadamente 2.23,5 toneladas anuales de pulpa fresca como subproducto del beneficio húmedo del café. Considerando la descomposición y reducción de humedad, esta cantidad se traduce en cerca de 1 tonelada de pulpa transformada en abono orgánico/ha.

La implementación del modelo de economía circular permitiría aprovechar el 100% de la pulpa, evitando su disposición inadecuada en el suelo y reduciendo significativamente la acumulación de residuos orgánicos sin tratamiento en el sistema productivo cafetero del distrito.

**Reducción Proyectada del Volumen de Aguas Residuales Contaminantes Generadas Durante el Proceso de Beneficio del Café.** En el distrito El Carmen se estiman aproximadamente 1.411 hectáreas cultivadas en café con un consumo promedio de agua de 45.756 m<sup>3</sup> que se convierten en aguas residuales o aguas mieles. La instalación de la tecnología de filtros verdes permitiría el tratamiento del 100% de estas aguas mieles, mitigando la contaminación del suelo y las fuentes hídricas y evitando la descarga directa de más de 45 mil metros cúbicos de aguas residuales altamente contaminantes por año.

**Potencial Reducción de la Carga Contaminante Asociada a los Vertimientos del Beneficio Húmedo del Café.** De acuerdo con (Zambrano-Franco & Izaza-Hinestroza, 1998; Gallego Ocampo & Mejía Francia, 2016), citado de Jaulis, C et al., (2022), la carga contaminante de las aguas mieles se expresa en términos de Demanda Química de Oxígeno (DQO), donde la

concentración de DQO en aguas residuales puede alcanzar 33.000 ppm, lo que equivale a 33 g/L de DQO.

Y en base a que el consumo de agua por kg de café pergamino seco es de 40 L/kg CPS, entonces la carga de DQO por kg CPS es de 1.320 g DQO/kg CPS ( $40 \text{ L} \times 33 \text{ g/L}$ ).

Ahora, partiendo de lo anterior al contexto local del distrito el Carmen que tiene una producción aproximada de 1.143,900 kg CPS (1.143,9 ton), entonces el DQO total anual sería de 1.509 t DQO/año ( $1.143.900 \text{ kg} \times 1,32 \text{ kg DQO/kg CPS}$ ).

Si se considera un escenario de mayor contaminación (110.000 ppm), la DQO total podría alcanzar hasta 5.033 t DQO/año, mostrando el potencial crítico de impacto ambiental de la actividad tradicional.

La implementación del modelo de economía circular en el distrito El Carmen no solo contribuye a la reducción de residuos sólidos y la carga contaminante de las aguas residuales, sino que también representa un ahorro económico significativo para la caficultura local.

Como se calculó previamente, la carga contaminante asociada a las aguas mieles del beneficio húmedo puede alcanzar hasta 1.509 toneladas de DQO al año, y en escenarios de alta contaminación podría superar las 5.033 toneladas de DQO. La eliminación o tratamiento de esta carga contaminante mediante métodos convencionales tendría un costo aproximado de 500.000 COP por tonelada de DQO (Cenicafe, 2022). Lo que implica que la descontaminación de estas aguas residuales podría representar un gasto anual entre 754,5 millones COP y 2.516,5 millones COP, dependiendo del escenario considerado.

Por lo tanto, la adopción del modelo de economía circular evita estos costos, al tratar el 100 % de las aguas mieles generadas mediante filtros verdes y aprovechar los subproductos sólidos como fertilizante orgánico. Este efecto combinado de reducción ambiental y ahorro económico refuerza la sostenibilidad del sistema productivo y mejora la viabilidad financiera de las fincas cafeteras del distrito

### ***Efectos Secundarios***

**Recuperación y Mejora de la Fertilidad del Suelo.** El empleo de la pulpa de café descompuesta en la fertilización del café puede contribuir al mejoramiento de la fertilidad del suelo en cuanto a la corrección de la acidez (aumento de pH y reducción de  $Al^{3+}$ ) y el incremento del contenido de la materia orgánica y de algunos nutrientes, principalmente potasio, calcio y magnesio. También, La fertilización con pulpa de café descompuesta en dosis que suplan los niveles de nutrientes requeridos por el cultivo, puede igualar la producción obtenida con la fertilización de fuentes de síntesis química (Salazar-Gutiérrez, F.L & Sadeghian-Khalajabadi, S 2023).

Con esto se promueve el mejorar la estructura del suelo y su capacidad de retención de agua. Reduciendo a su vez la dependencia de fertilizantes químicos, que a largo plazo degradan el suelo. Con esta iniciativa se está promoviendo al cumplimiento del ODS 2 que busca erradicar el hambre, lograr la seguridad alimentaria, mejorar la nutrición y promover la agricultura sostenible para 2030.

**Reducción de la Contaminación del Suelo y el Agua.** Cuando la pulpa de café y las aguas mieles se disponen sin tratamiento, generan alta carga orgánica (DQO y DBO) que contamina quebradas y suelos. Pero al integrarlas en una compostera controlada, se puede evitar

los vertimientos directos a fuentes hídricas, acidificación y degradación del suelo. Esto contribuye a la protección de microcuencas locales, clave para la caficultura del Huila. Así, como se estará contribuyendo al cumplir con el ODS 6 (Agua limpia), ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres).

**Disminución de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.** Cuando se produce la descomposición no controlada de la pulpa de café se produce metano (CH<sub>4</sub>) y malos olores. Como alternativa el compostaje de la pulpa reduce las emisiones de metano, así como disminuye la huella de carbono del proceso productivo del café. Se transforma un residuo contaminante en un sumidero de carbono orgánico en el suelo. Gracias a esta acción se está promoviendo a cumplir con el ODS 13 (Acción por el clima)

**Aprovechamiento Eficiente de Residuos.** El residuo deja de ser un problema y se convierte en insumo productivo. Se cierra el ciclo: producción → residuo → transformación → nuevo uso agrícola. Se disminuye la cantidad de residuos sólidos generados por los agronegocios cafeteros. Aportando al ODS 12 (Producción y consumo responsables)

### **Identificar Estrategias Para la Implementación del Modelo de Economía Circular**

Para el cumplimiento de este objetivo se aplicó una entrevista de 3 preguntas (ver apéndice 6), para grupo focal compuesta por cuatro preguntas abiertas, orientadas a identificar las barreras existentes, las necesidades de apoyo institucional y los mecanismos que pueden facilitar la implementación individual del modelo de economía circular en las unidades productivas cafeteras.

Durante el encuentro con el grupo focal se desarrolló un espacio participativo de diálogo y reflexión en el que participaron caficultores, representantes de asociaciones productivas,

líderes comunitarios y actores locales vinculados al sector cafetero del territorio. La sesión tuvo como propósito socializar y discutir el modelo de economía circular propuesto en el estudio, explicando sus componentes, alcances, beneficios potenciales y las condiciones necesarias para su implementación en las unidades productivas.

A partir de la discusión colectiva, los participantes compartieron sus percepciones, experiencias y puntos de vista frente a la viabilidad del modelo en el contexto local, lo que permitió identificar de manera conjunta las principales barreras técnicas, económicas e institucionales que podrían limitar su adopción. Entre estas se destacaron las restricciones financieras para asumir los costos iniciales de las tecnologías, el desconocimiento práctico sobre su manejo y la necesidad de acompañamiento técnico permanente.

De manera complementaria, el ejercicio permitió reconocer diversos mecanismos que podrían contribuir a superar dichas barreras, tales como la capacitación técnica, los esquemas de cofinanciación, la asistencia institucional y los programas de transferencia tecnológica. Asimismo, los participantes identificaron los aportes que estas estrategias tendrían para facilitar la implementación del modelo, especialmente en términos de reducción de impactos ambientales, aprovechamiento de subproductos del café y generación de beneficios económicos adicionales para los productores del municipio de Oporapa.

En la tabla 23 se presenta los resultados en seis categorías identificadas, barreras técnicas, económicas, asistencia técnica, transferencia tecnológica, incentivos ambientales y articulación institucional.

**Tabla 23***Hallazgos Grupo Focal*

Categoría de análisis	Hallazgos del grupo focal	Mecanismos institucionales identificados	Aporte al modelo de economía circular
Barreras técnicas	Los productores manifestaron limitaciones en el conocimiento práctico para implementar tecnologías como filtros verdes y procesos de descomposición de pulpa en sus fincas.	Programas de capacitación técnica orientados a la implementación individual de tecnologías de manejo de subproductos.	Facilita la adopción del modelo a nivel de unidad productiva.
Barreras económicas	Se evidenció que el principal obstáculo para la adopción del modelo es la falta de recursos inmediatos para cubrir los costos iniciales de infraestructura, aunque los productores manifestaron disposición a aportar (mano obra, aportes económicos), parcialmente si reciben apoyo institucional.	Esquemas de cofinanciación, subsidios ambientales, proyectos públicos y líneas de crédito rural para tecnologías sostenibles.	Reduce la principal limitante para la implementación del modelo en finca.

---

Asistencia técnica	Los participantes destacaron que la adopción del modelo requiere acompañamiento continuo para garantizar la correcta instalación y manejo de las tecnologías.	Fortalecimiento de los servicios de extensión rural y asistencia técnica especializada.	Asegura la sostenibilidad y correcta aplicación del modelo.
Transferencia tecnológica	Se identificó desconocimiento sobre experiencias prácticas locales de aprovechamiento de subproductos, lo que genera incertidumbre en su adopción.	Implementación de parcelas demostrativas y programas de transferencia tecnológica en territorio.	Promueve la confianza y adopción progresiva del modelo.
Incentivos ambientales	Los productores manifestaron interés en adoptar prácticas sostenibles cuando estas se relacionan con beneficios económicos o incentivos institucionales.	Programas de incentivos ambientales, certificaciones sostenibles y estímulos por buenas prácticas.	Motiva la adopción voluntaria del modelo.
Articulación institucional	El grupo focal evidenció que la implementación del modelo se concibe principalmente como un proceso individual en finca, que requiere articulación con	Alianzas institucionales para cofinanciación, asistencia técnica y formulación de	Permite viabilizar el modelo mediante apoyo externo y reduce barreras de adopción.

---

---

instituciones para acceder a	proyectos de
financiamiento, capacitación y	economía circular.
acompañamiento técnico.	

---

*Nota.* En la tabla se refleja los hallazgos del grupo focalizado.

A partir del diálogo participativo se identificaron diversas barreras, así como mecanismos institucionales que podrían facilitar su adopción.

En relación con las barreras técnicas, durante el encuentro los caficultores manifestaron que, aunque reconocen la importancia ambiental del tratamiento de subproductos del café, presentan limitaciones en el conocimiento práctico para implementar tecnologías como los sistemas de filtros verdes y los procesos de descomposición de pulpa. Los participantes señalaron que requieren orientación clara sobre la construcción, manejo y mantenimiento de estas tecnologías en condiciones reales de finca. Frente a esta situación, se identificó la necesidad de programas de capacitación técnica orientados específicamente a la implementación individual de estas prácticas, lo cual contribuiría a facilitar la adopción del modelo a nivel de unidad productiva.

Respecto a las barreras económicas, los actores coincidieron en que el principal obstáculo para la implementación del modelo radica en la falta de recursos inmediatos para cubrir los costos iniciales de infraestructura. No obstante, durante la discusión se evidenció una disposición positiva de los productores para aportar parcialmente en la implementación, mediante mano de obra, materiales disponibles en finca o contribuciones económicas limitadas, siempre que exista apoyo institucional complementario.

En este sentido, se identificaron como mecanismos clave los esquemas de cofinanciación, subsidios ambientales, proyectos públicos y líneas de crédito rural, los cuales permitirían reducir la principal limitante económica para la adopción del modelo.

En cuanto a la asistencia técnica, los participantes resaltaron que la correcta implementación de las tecnologías requiere acompañamiento continuo por parte de profesionales especializados. Señalaron que, sin orientación permanente, existe el riesgo de que las prácticas no se apliquen adecuadamente o se abandonen con el tiempo. Por ello, se planteó la importancia de fortalecer los servicios de extensión rural y asistencia técnica especializada, lo que garantizaría la sostenibilidad y correcta aplicación del modelo en el largo plazo.

De igual forma, en el componente de transferencia tecnológica se identificó un desconocimiento generalizado sobre experiencias exitosas locales relacionados con el aprovechamiento de subproductos del café. Esta situación genera incertidumbre entre los productores respecto a los resultados reales de las tecnologías propuestas. Como mecanismo de solución, los participantes sugirieron la implementación de parcelas demostrativas y programas de transferencia tecnológica en territorio, los cuales permitirían evidenciar de manera práctica los beneficios del modelo y promover su adopción progresiva.

En relación con los incentivos ambientales, los caficultores manifestaron interés en adoptar prácticas sostenibles cuando estas se vinculan con beneficios económicos tangibles o estímulos institucionales. Durante el diálogo se destacó que el acceso a certificaciones ambientales, incentivos por conservación y programas de sostenibilidad puede convertirse en un factor motivador para la implementación voluntaria del modelo.

Finalmente, en el componente de articulación institucional, el grupo focal evidenció que los productores conciben la implementación del modelo principalmente como un proceso individual en finca, más que como una iniciativa colectiva entre caficultores. Sin embargo, señalaron que este proceso requiere una fuerte articulación con instituciones del sector para acceder a financiamiento, capacitación y acompañamiento técnico. En este sentido, se identificó la necesidad de fortalecer alianzas interinstitucionales orientadas a la cofinanciación, asistencia técnica y formulación de proyectos, lo cual permitiría viabilizar el modelo y reducir las barreras de adopción.

En conjunto, los resultados del trabajo de campo evidencian que la implementación del modelo de economía circular depende en gran medida de la articulación efectiva entre productores e instituciones, más que de procesos de cooperación horizontal entre caficultores, destacando la importancia de estrategias de apoyo institucional para garantizar su viabilidad en el territorio.

## Discusión

El presente estudio se orientó a proponer un modelo de economía circular para el aprovechamiento de los subproductos del café en el distrito El Carmen – Oporapa, partiendo del reconocimiento de que estos residuos poseen un alto potencial de valorización. En este sentido, los resultados obtenidos confirman lo planteado por Mendes dos Santos et al. (2021), quienes señalan que los subproductos del café contienen compuestos con múltiples aplicaciones y que su transformación permite “contribuir a la reducción de impactos ambientales asociados a su disposición inadecuada”.

La alta generación de pulpa (90 %) y mucílago (85 %) identificada en el territorio evidencia la disponibilidad de materia prima para procesos de economía circular y valida el enfoque teórico sobre el potencial de estos residuos.

Adicionalmente, el beneficio húmedo tradicional constituye una de las principales fuentes de contaminación en sistemas cafeteros debido a la elevada carga orgánica de las aguas mieles (Pérez-Osorio et al., 2025). Si bien en muchos contextos esta situación se asocia con prácticas de disposición inadecuada, en El Carmen se identificó que el 60% de los productores reincorpora los residuos al suelo, lo que introduce un matiz relevante: el problema no radica exclusivamente en la ausencia de prácticas de aprovechamiento, sino en su bajo nivel de tecnificación, estandarización y articulación productiva.

La caracterización de los residuos mostró que la pulpa y el mucílago son los subproductos predominantes, lo cual coincide con la definición de subproductos del café propuesta por Rodríguez y Zambrano (2010), quienes los describen como materiales generados en las diferentes etapas del beneficio del grano. Este hallazgo confirma que el proceso de

beneficio húmedo constituye el principal punto de generación de biomasa residual y, por tanto, el escenario estratégico para la implementación de prácticas de aprovechamiento. No obstante, mientras experiencias internacionales como la de Espinola-Portilla y Villaseñor-Basulto (2025) reportan procesos de transformación con mayor nivel de industrialización, por ejemplo, la producción de carbón activado con inserción en cadenas de valor externas.

En El Carmen el aprovechamiento se orienta principalmente al autoconsumo productivo. Esta diferencia refleja una adaptación a la estructura productiva local, caracterizada por fincas de pequeña escala (1–3 ha) y limitada capacidad de inversión. Así, la economía circular en este contexto se orienta más a la reducción de costos y autosuficiencia que a la diversificación industrial

El hecho de que solo el 40–45 % de los productores conozca o aplique tecnologías de aprovechamiento confirma lo señalado por Arboleda, Echeverría y Jiménez (2023) respecto a las restricciones tecnológicas en organizaciones cafeteras. Esta brecha técnica no implica resistencia al cambio, ya que el 90 % manifiesta disposición para adoptar el modelo, en concordancia con lo expuesto por Requelme (2023), quien sostiene que la viabilidad de la economía circular en caficultura depende del acompañamiento institucional y la capacitación técnica. En este sentido, los resultados sugieren que las principales barreras son estructurales, financiamiento y formación más que culturales.

Desde el punto de vista económico, el escenario de fertilización orgánico-mineral presentó un VAN positivo, una TIR del 15 % y una relación costo-beneficio de 1,09, demostrando su viabilidad en el mediano plazo. Este resultado evidencia un proceso de valorización de residuos, ya que la pulpa pasa de ser un desecho a un insumo productivo que

reduce la dependencia de fertilizantes químicos, lo cual coincide con la definición de valor agregado como un elemento que incrementa el valor comercial de un bien mediante su diferenciación.

Además, se alinea con los planteamientos de Salazar-Gutiérrez y Sadeghian-Khalajabadi (2023), quienes demostraron que la pulpa descompuesta puede suplir parcialmente los requerimientos nutricionales del cultivo cuando se integra en esquemas de fertilización combinada, evidenciando que la sostenibilidad en pequeños productores requiere equilibrio entre criterios ambientales y eficiencia económica.

En el ámbito ambiental, la implementación del despulpado en seco y el uso de filtros verdes permite reducir significativamente la carga contaminante de las aguas mieles, lo que se alinea con los principios de reducir, reutilizar y recuperar materiales a lo largo de la cadena de suministro. Además, la implementación de estrategias de aprovechamiento de las aguas residuales del beneficio del café permite evitar los costos asociados a los permisos de vertimiento exigidos por la normativa ambiental colombiana.

En particular, la Resolución 699 de 2021 y el Decreto 50 de 2018 establecen que cuando se realiza descarga de aguas residuales es obligatorio tramitar permisos ambientales y efectuar estudios técnicos cuyos costos pueden superar los ocho millones de pesos (Rodríguez-Valencia et al., 2022). Cuando estas aguas son reincorporadas al sistema productivo mediante prácticas de economía circular, dejan de considerarse vertimiento y pasan a clasificarse como aprovechamiento agrícola del residuo, generando no solo un beneficio ambiental, sino un ahorro económico indirecto y mayor cumplimiento normativo.

En el componente social, el 92 % de los productores percibe que el modelo generará beneficios comunitarios, lo cual demuestra su aceptación territorial y su potencial como estrategia de desarrollo rural. El análisis mediante grupo focal permitió identificar que la implementación del modelo requiere procesos de cooperación entre caficultores, asociaciones, extensionistas y proveedores. Este resultado coincide con Espinola-Portilla y Villaseñor-Basulto (2025), quienes señalan que la economía circular exige articulación entre actores y fortalecimiento de estrategias empresariales para superar barreras de adopción.

En este sentido, la sostenibilidad del modelo dependerá no solo de su viabilidad técnica y económica, sino de la consolidación de redes de cooperación que permitan escalar progresivamente las estrategias de aprovechamiento.

En conjunto, los resultados confirman el potencial técnico y ambiental de los subproductos del café señalado en la literatura, pero evidencian que la economía circular en territorios cafeteros de pequeña escala adopta una lógica distinta a la observada en experiencias industriales. En El Carmen, la valorización no se orienta prioritariamente a la generación de nuevos mercados, sino a la reducción de costos, cumplimiento normativo, fortalecimiento de la sostenibilidad local y mejora de la competitividad productiva. Esta adaptación contextual constituye uno de los principales aportes del estudio, al demostrar que la transición hacia modelos circulares requiere coherencia entre tecnología, escala productiva y capacidades territoriales.

## Conclusiones

### Componente Ambiental

La cañicultura en el distrito El Carmen genera una alta proporción de subproductos, principalmente pulpa y mucílago, que representan cerca del 90 % de los residuos del beneficio húmedo. Aunque parte de estos residuos es aprovechada mediante prácticas tradicionales como el compostaje, aún persisten vertimientos de aguas mieles que generan impactos sobre el suelo y las fuentes hídricas, evidenciando la necesidad de fortalecer la educación ambiental y la transferencia tecnológica.

La implementación del despulpado en seco se consolida como la estrategia preventiva más eficiente para la reducción de la contaminación hídrica, al evitar que aproximadamente el 72 % de la carga orgánica llegue a las fuentes de agua y permitir la conservación de la pulpa para su aprovechamiento. Complementariamente, los filtros verdes representan una alternativa eficaz y de bajo costo para el tratamiento y recirculación de aguas residuales, posibilitando además el aprovechamiento de lodos como insumo orgánico.

El modelo permite proyectar el tratamiento total de las aguas mieles, evitando la descarga de aproximadamente 141.170 m<sup>3</sup> de aguas residuales al año y reduciendo significativamente la carga orgánica asociada al beneficio húmedo. Asimismo, el uso de pulpa descompuesta en la fertilización favorece la recuperación de la fertilidad del suelo, incrementa el contenido de materia orgánica, contribuye a la disminución de emisiones de metano y consolida el cierre del ciclo de nutrientes bajo un enfoque de producción sostenible.

En conjunto, el modelo ambientalmente permite el aprovechamiento del 100 % de la pulpa generada, transformando un residuo altamente contaminante en un recurso estratégico para la sostenibilidad del sistema cafetero.

### **Componente Económico**

El análisis económico evidenció que la fertilización orgánico-mineral es la alternativa más eficiente y viable para el contexto local, al presentar el menor costo por hectárea, generar ahorros sostenidos y alcanzar indicadores financieros positivos (VAN > 0, TIR del 15 % y relación C/B de 1,09). Esto confirma que la valorización de la pulpa como insumo productivo no solo es ambientalmente pertinente, sino también rentable en el mediano plazo.

La implementación de la compostera resulta económicamente accesible para los caficultores, dado que la mayor inversión se concentra en la infraestructura inicial, mientras que el proceso operativo depende principalmente de mano de obra familiar y recursos propios. El plan operativo estructurado demuestra que el compostaje es biológicamente eficiente y permite obtener un abono orgánico de alto valor en un periodo de 12 a 16 semanas, con mínima dependencia de insumos externos.

La valorización de la pulpa transforma un residuo sin uso comercial en un recurso que reduce la dependencia de fertilizantes químicos y estabiliza los costos de producción. Por su parte, los filtros verdes, aunque no generan ingresos directos, producen beneficios económicos preventivos al evitar sanciones ambientales, costos asociados a permisos de vertimiento y pérdidas de productividad derivadas de la degradación ambiental.

En este sentido, el modelo demuestra que la economía circular puede mejorar la eficiencia financiera del sistema productivo, reducir riesgos regulatorios y fortalecer la sostenibilidad económica de las familias caficultoras.

### **Componente Territorial**

La caficultura en El Carmen se desarrolla principalmente en pequeñas unidades productivas de 1 a 3 hectáreas, con predominio del trabajo individual, lo que limita procesos de tecnificación, asociatividad y adopción de innovaciones debido a restricciones de inversión, asistencia técnica y acceso a financiamiento.

Aunque el 60 % de los productores manifiesta conocer alternativas de aprovechamiento, solo una parte las implementa, lo que evidencia que las principales barreras no son únicamente de conocimiento, sino económicas y técnicas. Los resultados del grupo focal confirmaron que la inversión inicial y el desconocimiento práctico son obstáculos relevantes; sin embargo, también se identificó una alta disposición (90 %) para adoptar el modelo si se cuenta con cofinanciación, capacitación y acompañamiento técnico.

El modelo tiene el potencial de beneficiar directamente a 743 familias caficultoras del distrito, al reducir costos productivos, fortalecer la seguridad económica del hogar y promover la generación de capacidades técnicas en manejo de residuos y fertilización sostenible. No obstante, su viabilidad depende en gran medida de la articulación institucional, la asistencia técnica continua y los mecanismos de transferencia tecnológica en campo, más que de procesos espontáneos de cooperación horizontal entre productores.

Finalmente, el modelo presenta alta correspondencia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 8, 9, 12, 13 y 17), al promover producción responsable, innovación rural,

acción climática, generación de ingresos y trabajo articulado entre actores del sector cafetero. Esto posiciona la propuesta como una estrategia integral de desarrollo territorial sostenible, coherente con las condiciones socioeconómicas del distrito El Carmen.

## Recomendaciones

Fortalecer la capacitación de los productores en prácticas de aprovechamiento y transformación de subproductos del café, con énfasis en técnicas sostenibles y de bajo costo que permitan agregar valor a la producción local.

Promover alianzas interinstitucionales entre asociaciones de caficultores, entidades ambientales, universidades y autoridades locales, con el fin de consolidar un modelo de gestión integral que impulse la economía circular en el territorio.

Implementar pequeñas unidades de demostración o pilotos productivos que muestren la viabilidad técnica y económica del uso de subproductos (pulpa, mucílago, aguas mieles, cascarilla) en la elaboración de compost, biogás, bioinsumos o alimentos balanceados.

Fortalecer la educación ambiental comunitaria, fomentando la conciencia sobre la reducción de residuos y la reutilización de materiales en los procesos productivos.

Desarrollar estrategias de seguimiento y evaluación para medir el impacto ambiental, social y económico de las alternativas implementadas, garantizando la mejora continua del modelo propuesto.

Incorporar el enfoque de sostenibilidad territorial, integrando aspectos climáticos, sociales y culturales que permitan adaptar las estrategias de economía circular a las condiciones específicas del distrito El Carmen.

### Referencias Bibliográficas

- Arboleda, V., Echeverría, M., & Jimenez, C (2023). La Orientación Tecnológica Y La Economía Circular En El Desempeño Empresarial Del Sector Cafetero. [Tesis de Ingeniería, Universidad CES]. Repositorio Institucional CES  
<https://repository.ces.edu.co/server/api/core/bitstreams/a47dda78-27c0-428a-a1af-c0439c2a18fc/content>
- Alcaldía de Oporapa. (2023). Obtenido de Alcaldía de Oporapa: <http://www.oporapa-huila.gov.co/>
- Arosa-Carrera Charles R., (2016). Los agronegocios y la innovación en la sociedad de la modernidad líquida. Revista "Boletín El Conuco", 3(2), 1-9.  
<https://doi.org/10.22579/2619-614X.769>
- Arroyo, F. R. (2018). La Economía Circular Como Factor De Desarrollo Sustentable Del Sector Productivo. INNOVA Research Journal, 3(12), 78-98.
- Andersen, M. (2006). An introductory note on the environmental economics of the circular. Sustainability Science, 2, 133-140.
- Creswell, J. W. (2014). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (4th ed.). Sage Publications.
- Cochran, W. G. (1977). Sampling techniques (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Consejo Municipal de Oporapa, (2024). Plan de Desarrollo, Oporapa, Una Vía Para la Oportunidad 2024-2027.

<https://www.sirhuila.gov.co/media/ZbRepository/ZbFiles/2025/6/4d44df27f4694698ab9b78a4751622a6.pdf>

Comisión Europea. (2022). Un Pacto Verde Europeo. Pacto Verde Europeo,  
[https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_es](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es)

Campos, T., Murga, V., Rituay, T., & Rosero, G (2021). Sostenibilidad del café: revisión sistemática de la literatura. *Revista Venezolana de Gerencia*, vol. 26, núm. 95, 943-961.  
<https://www.redalyc.org/journal/290/29069613028/html/>

Centro de Comercio Internacional, (2024). El mundo del café: una industria dinámica y en crecimiento. <https://www.intracen.org/es/centro-de-recursos-de-la-guia-del-cafe/el-mundo-del-cafe>

Confecámaras, (2024). Asociatividad: mecanismo para la transformación productiva del sector agrícola en Colombia. <https://confecamaras.org.co/wp-content/uploads/2024/01/estudio-asociatividad-feb-27.pdf>

Cenicafe, (2022). Adopción del beneficio ecológico del café en Colombia. Avance Técnico Cenicafe 543. <https://scispace.com/pdf/adopcion-del-beneficio-ecologico-del-cafe-en-colombia-2sxlxl.pdf>

Cenicafe. (2008). Propiedades Físicas Y Factores De Conversión Del Café En El Proceso de beneficio. *Boletín técnico número 370*.  
<https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/358/1/avt0370.pdf>

- Departamento Nacional de Planeación. (2018). Política de crecimiento verde (CONPES 3934).  
<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/conpes-3934-de-2018.pdf>
- Espinola-Portilla & Villaseñor-Basulto (2025). Economía circular del bagazo de café: emprendimiento-caso práctico. 1-20. <https://doi.org/10.61728/AE20251628>
- Espinoza, H., A. (2023). Economía circular: una aproximación a su origen, evolución e importancia como modelo de desarrollo sostenible. *Revista de Economía Institucional*, 25(49), 109-134. <https://doi.org/10.18601/01245996.v25n49.06>
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). Closing the loop: An action plan for the circular economy.
- Erkman, S. (1997). Industrial ecology: An historical view. *Journal of Cleaner Production*, 5(1-2), 1-10.
- Fernández-Cortés, Y, Sotto-Rodríguez, K & Vargas-Marín, L (2020). Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. *Producción + Limpia*, 15(1), 93-110.  
<https://revistas.unilasallista.edu.co/index.php/pl/article/view/2333/210210509>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2020). Fosa de recirculación de agua residual. [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=0DBrV2hZ5uc&t=331s>
- Frosch, R. (1992). Industrial ecology: A philosophical introduction. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 89(3), 800-803
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., & Hultink, E. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm?. *Revista de LimpiadoresProducción* 143:757–768.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

- Graedel, T. E., & Allenby, B. R. (1995). *Industrial Ecology*. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(97\)00094-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00094-3)
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta ed.). McGraw-Hill.
- ISO. (2006). *ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment*.
- Jacobsen, N. (2006). Application and implementation, *Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark A Quantitative Assessment of Economic and Environmental Aspects*. *Journal of Industrial Ecology*, 240-241.
- Jaulis, C., Juscamaita, M., Villanueva, S (2022). Limpieza del aguamiel proveniente del beneficiado húmedo del café mediante polímeros naturales orgánicos. 3 (3). *Revista de Investigación Científica y Tecnológica Alpha Centauri*.  
<https://doi.org/10.47422/ac.v3i3.84>
- Jiménez-Romera, Forero-Suárez & Ruiz-Hernández (2017). Tecnología y diseño para el desarrollo rural: propuesta metodológica y prueba de concepto en dos municipios colombianos. *Revista de Estudios sobre Despoblación y Desarrollo Rural*, núm. 23, pp. 27-57. <https://www.redalyc.org/journal/296/29653217002/html/>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions.
- Kirchherr, J., Nadja (2023). Conceptualización de la economía circular (revisitada): un análisis de 221 definiciones. *Recursos, conservación y reciclaje* (194).  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001>

- Moreno, E., et al., (2025). Modelo ADDIE para desarrollar anteproyectos doctorales en un posgrado en línea. 16. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/10431850.pdf>
- Mendes dos Santos, É., Malvezzi de Macedo, L., Lacalendola Tundisi, L., Artem Ataide, J., Anne Camargo, G., C. Alves, R., Oliveira, M. B. P. P., & Gava Mazzola, P. (2021). Coffee by-products in topical formulations: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 280–291. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.064>
- ONU, (2025). Objetivos y metas de desarrollo sostenible.  
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- Oliveros-Tascón, C. E., Ramírez, C. A., Rodríguez-Valencia, N., Sanz-Urbe, J. R., & Tibaduiza, C. A. (2022). Manejo y aprovechamiento de las aguas residuales del lavado del café con la tecnología ECOMILL®. *Avances Técnicos Cenicafé*, 538, 1–8.  
<https://doi.org/10.38141/10779/0538>
- Pauli, G. (2011). *La economía azul: 10 años, 100 innovaciones, 100 millones de empleos: Un informe para el Club de Roma*. Barcelona: Tusquets.
- Pérez-Osorio, G., Avelino-Flores, F., Hernández-Lorenzo, B., Gutiérrez-Arias, J.E.M., Mendoza-Hernández, J.C., Chavarin-Pineda, Y. (2025). Evaluación del impacto de las aguas residuales del beneficio húmedo del café en Xicotepec, México. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 28(1):e271. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2717>
- Rodríguez-Valencia, N., Arboleda-Ospina, C. C., & Castañeda, S. A. (2025). Tecnología de filtros verdes con cero descargas para el tratamiento de aguas residuales. En I. D.

- Aristizábal (Ed.), *Memorias del XIII Congreso Colombiano de Ingeniería Agrícola y Áreas Afines CONCIA*. Medellín, Colombia
- Rodríguez V., N., Castañeda, S. A., Quintero Y., L. V., & Osorio O., A. F. (2016). Tratamiento de aguas en fincas cafeteras. Cenicafé – Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.
- Rodríguez-Valencia, N., Zambrano Franco, D. A., & Ramírez, C. A. (2013). Manejo y disposición de los subproductos y de las aguas residuales del beneficio del café. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura*. 3, pp. 111–136. Cenicafé. [https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/4347/1/cenbook-0026\\_31.pdf](https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/4347/1/cenbook-0026_31.pdf)
- Rodríguez, V., Zambrano, F (2010). Los Subproductos Del Café: Fuente De Energía Renovable. Avance Técnico 393. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/351/1/avt0393.pdf>
- Requelme, H (2023). Propuesta De Economía Circular Delcultivo De Café En Productores De Ñunyajalca, Distrito Bagua Grande, 2021. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez De Mendoza de Amazonas]. Repositorio Institucional UNTRM. <https://hdl.handle.net/20.500.14077/3245>
- Salamanca, F (2024). Análisis de las políticas públicas en el sector cafetalero en Colombia: un análisis desde la perspectiva de la competitividad sistémica. *Revista CEA* , 10 (24). <https://doi.org/10.22430/24223182.3039>
- Suárez, R., Méndez, A & López, S (2023). Desarrollo sostenible en territorios rurales en la última década: una revisión del estado del arte. (9) 7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17555>

Salazar-Gutiérrez, F.L. & Sadeghian-Khalajabadi, S (2023). Fertilización órgano- mineral en el cultivo del café. Consideraciones para su implementación. Cenicafe. <https://doi.org/10.38141/10779/0549>

TerriData, (2024). Oporapa, Huila. Departamento Nacional de Planeación. [https://terridata.blob.core.windows.net/fichas/Ficha\\_41503.pdf](https://terridata.blob.core.windows.net/fichas/Ficha_41503.pdf)

Tique, A (2020). Plan de negocios para la creación de la Asociación de Empresarios Cafeteros Agroecológico Timaná. [Tesis de maestría, Universidad EAN]. Repositorio Institucional UNIVERSIDADEAN. <https://repository.universidadean.edu.co/server/api/core/bitstreams/ff6c2030-826e-40bd-b3be-af58eb2fff1a/content>

Terán-Rivera, S. C., Torres-Martínez, B. del M., Torrescano-Urrutia, G. R., Esqueda, M., Sánchez-Escalante, A., & Vargas-Sánchez, R. D. (2023). Residuos del procesamiento del fruto de café como fuente natural de antioxidantes para la industria cárnica. TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas, 26. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2023.540>

Universidad de Guadalajara, (2022). Valor Agregado Y Propuesta Unica De Valor (PUV). <http://biblioteca.udgvirtual.udg.mx/jspui/bitstream/123456789/2972/1/Valor%20agregado%20y%20propuesta%20única%20de%20valor.pdf>

Vilardo., U, (2024). Principios guía para adoptar la circularidad en el sector de la salud. <https://lac.saludsindanio.org/media/6079/download?inline=1>

Vasileios, R., Katja, T., y Arno, B. (2017). CEPS The Circular Economy A review of definitions, processes and impacts. Research Report, 2-4.

## Apéndices

### Apéndice A

*Autor Proyecto en Unidad Productiva de Café, El Carmen de Oporapa*



*Nota. Autoría Propia.*

**Apéndice B**

*Evidencia de Disposición Actual de Pulpa de Café, El Carmen Oporapa*



*Nota. Autoría Propia.*

## Apéndice C

### *Grupo de Caficultoras, Asociativo Aroma de Mujer*



*Nota. Autoría Propia.*

## Apéndice D

*Caficultores del Distrito El Carmen.*



*Nota. Autoría Propia*

## Apéndice E

### *Formato Entrevista Semiestructurada*

#### **Entrevista Dirigida a Caficultores del Distrito el Carmen de Oporapa – Huila**

##### **Consentimiento Informado del Tratamiento de Datos Personales**

De conformidad con lo establecido en la Ley 1581 de 2012 y sus decretos reglamentarios, autorizo de manera libre, previa, expresa e informada a Alexis Andrey Ramírez Gaitán, investigador del proyecto “Modelo de economía circular para el aprovechamiento de subproductos residuales del agronegocio de café en el distrito El Carmen, municipio de Oporapa, Huila”, para recolectar, almacenar, usar, procesar y tratar mis datos personales con fines exclusivamente académicos e investigativos.

Los datos suministrados serán utilizados únicamente para la caracterización de los sistemas productivos cafeteros, el análisis del manejo de subproductos residuales y la formulación de propuestas orientadas al fortalecimiento de modelos de economía circular en la región.

Se me ha informado que mis datos serán manejados de forma confidencial, no serán compartidos con terceros y no serán utilizados con fines comerciales.

Asimismo, conozco que, como titular de la información, tengo derecho a:

- Conocer, actualizar y rectificar mis datos personales.
- Solicitar prueba de la autorización otorgada.
- Ser informado sobre el uso que se ha dado a mis datos.
- Revocar la autorización y solicitar la supresión de la información cuando lo considere pertinente.

Yo \_\_\_\_\_

Declaro que la información suministrada es veraz y que otorgo esta autorización de manera voluntaria.

### SECCIÓN 1. INFORMACIÓN GENERAL

**Vereda o zona:** \_\_\_\_\_ **Fecha:** \_\_\_\_\_

**Tamaño del cultivo (en hectáreas):**

Menos de 1 ha

1–3 ha

Más de 3 ha

**Tipo de organización:**

Individual

Asociación

Cooperativa

### SECCIÓN 2. MANEJO DE SUBPRODUCTOS

**¿Qué tipo de residuos genera en el beneficio del café? (puede marcar varios)**

- Pulpa
- Mucílago
- Cascarilla
- Otros: \_\_\_\_\_

**¿Qué hace actualmente con estos residuos?**

- Los desecha
- Los usa como abono
- Los vende
- Los quema
- Otro: \_\_\_\_\_

**¿Conoce o aplica alguna tecnología de aprovechamiento (compostaje, biogás, bioabono, etc.)?**

- Sí
- No

Si la respuesta es sí, ¿cuál? \_\_\_\_\_

SECCIÓN 3. ASPECTOS TÉCNICOS Y ECONÓMICOS

**¿Cuánto gasta aproximadamente al año en el manejo o disposición de residuos?**

- Menos de \$500.000
- \$500.000–\$1.000.000
- Más de \$1.000.000

**¿Estaría dispuesto a implementar un modelo de aprovechamiento si reduce costos o mejora ingresos?**

- Sí
- No
- No sabe

**¿Qué apoyo considera necesario para hacerlo?**

- Capacitación técnica
- Financiamiento
- Equipos
- Asesoría
- Otro: \_\_\_\_\_

#### SECCIÓN 4. OPINIONES Y PERCEPCIONES

En una escala de 1 a 5, **¿qué tan importante considera aprovechar los residuos del café?**

(1 = Nada importante, 5 = Muy importante)

1 2 3 4 5

**¿Cree que un modelo de economía circular podría beneficiar a su comunidad?**

 Sí No No sabe

Observaciones o comentarios del productor:

---

---

---

**Gracias por su valiosa Participación**

*Nota. Autoría Propia*

## Apéndice F

### *Formato de Entrevista Grupo Focal*

#	Pregunta	Respuestas principales del grupo	Observaciones / Comentarios
1	<p><b>Situación actual:</b> ¿Qué dificultades tienen actualmente para implementar prácticas de manejo y aprovechamiento de los residuos del café en sus fincas?</p>		
2	<p><b>Apoyo necesario y mecanismos de implementación:</b> ¿Qué tipo de apoyo consideran necesario y cómo debería entregarse para aplicar tecnologías como el tratamiento de aguas mieles o el compostaje de la pulpa, considerando las limitaciones económicas de la finca?</p>		
3	<p><b>Rol institucional:</b> ¿Qué instituciones o programas podrían apoyar a los caficultores en la implementación de estas prácticas sostenibles?</p>		

*Nota.* Autoría Propia