

Estado del Arte de la Disminución de la Huella Hídrica Mediante el Diseño Sustentable del  
Beneficio Húmedo del Café

Jose Luis González Ipuz y Laura Juliana Vega Rojas

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico  
Modalidad trabajo de investigación

Director

Crisóstomo Barajas Ferreira

Ingeniero Químico M. Sc.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

### **Dedicatoria**

*A Dios inicialmente, por ser nuestra guía durante todo el camino, por llenarnos de sabiduría, paciencia y carisma para afrontar todos los retos que nos proponemos. Además, por todas las bendiciones y oportunidades en nuestros caminos.*

*A nuestros padres, por el apoyo incondicional, la educación y confianza brindada, por ayudar a forjar nuestros caminos, por ser nuestros ejemplos a seguir y nuestra mayor inspiración para superar todos los obstáculos y dar cumplimiento a nuestras metas.*

*A nuestros hermanos por guiarnos en cada paso, apoyarnos en todo momento y por ser nuestros cómplices en nuestra aventura de vida y darnos otra perspectiva del mundo.*

*A nuestros amigos y compañeros de pregrado por los conocimientos compartidos y experiencias vividas durante esta etapa.*

### **Agradecimientos**

Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander – UIS, por brindarnos la formación íntegra como ingenieros químicos, mediante su calidad docente, quienes nos transmitieron sus conocimientos y experiencias que facilitaron este aprendizaje, además de sus espacios de integración que complementaron esta formación.

A nuestro director Crisóstomo Barajas Ferreira, por las enseñanzas, inspiración y acompañamiento brindado, por disponer de su tiempo para guiarnos durante la realización de este proyecto.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1 Marco Teórico.....	14
1.1 Huella hídrica.....	14
1.1.1 Huella hídrica verde.....	14
1.1.2 Huella hídrica azul .....	14
1.1.3 Huella hídrica gris.....	15
1.2 Composición del café.....	15
1.3 Beneficio del café .....	15
1.4 Etapas del beneficio húmedo del café.....	16
1.4.1 Cosecha del fruto .....	16
1.4.2 Transporte al beneficiadero.....	16
1.4.3 Selección de las cerezas .....	16
1.4.4 Despulpado .....	17
1.4.5 Desmucilaginado.....	17
1.4.6 Lavado.....	17
1.4.7 Secado .....	17
2 Objetivos.....	18
2.1 Objetivo General.....	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
3 Metodología .....	19
3.1 Búsqueda y selección de artículos científicos en la base de datos.....	19

3.2	Revisión, organización y análisis de los documentos seleccionados.....	20
3.2.1	Filtro por título.....	20
3.2.2	Filtro por resumen.....	20
3.2.3	Filtro por contenido.....	20
3.3	Metodología para proponer un diseño .....	21
4	Resultados .....	21
4.1	Selección del fruto de café.....	21
4.2	Despulpado .....	23
4.3	Desmucilaginado.....	25
4.3.1	Fermentación.....	25
4.3.2	Lavado.....	26
4.4	Secado .....	27
4.5	Equipos integrados.....	32
4.6	Tratamiento de residuos.....	34
4.7	Alternativa para el beneficio del café .....	37
5	Conclusiones .....	43
6	Recomendaciones .....	45
	Referencias Bibliográficas .....	47
	Apéndices.....	53

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Descripción de métodos de selección del café</i> .....	21
Tabla 2 <i>Equipos de despulpado convencional</i> .....	23
Tabla 3 <i>Descripción de métodos de lavado con consumo de agua</i> .....	26
Tabla 4 <i>Defecto en el grado debido a las malas prácticas en el secado</i> .....	28
Tabla 5 <i>Descripción de los métodos de secado</i> .....	28
Tabla 6 <i>Desmucilaginosos integrados</i> .....	33
Tabla 7 <i>Aguas mieles como residuo del procesamiento de café</i> .....	34
Tabla 8 <i>Pulpa como residuo del procesamiento de café</i> .....	36
Tabla 9 <i>Mucilago como residuo del procesamiento de café</i> .....	37
Tabla 10 <i>Café Honey</i> .....	39

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Esquema de la descripción metodológica del proyecto</i> .....	19
Figura 2 <i>Alternativa 1 de procesamiento de café</i> .....	41
Figura 3 <i>Diagrama de alternativa 2 para procesamiento de café.</i> .....	38

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Distribución porcentual de la huella hídrica en los productos agrícolas .....	53
Apéndice B. Composición de la cereza de café .....	53
Apéndice C. Ecuaciones de búsqueda empleadas en Scopus .....	53
Apéndice D. Ecuaciones de búsqueda empleadas en Web of Science .....	54
Apéndice E. Estudios asociados a la selección de las cerezas de café .....	55
Apéndice F. Estudio asociado a la fermentación de café.....	57
Apéndice G. Estudios asociados al secado solar en patios .....	58
Apéndice H. Estudios asociados al secado solar parabólico y túneles solares .....	59
Apéndice I. Estudios asociados al beneficio ecológico .....	61
Apéndice J. Estudios asociados al tratamiento de aguas mieles.....	62
Apéndice K. Estudios asociados a humedales artificiales (sistema biológico) .....	63
Apéndice L. Estudios asociados al tratamiento de residuos sólidos.....	65
Apéndice M. Estudios asociados al tratamiento del mucilago .....	66

## Glosario

**Cerezas de café:** Es el fruto maduro del arbusto de café (cafeto), resultado de la floración, obtenida por los buenos manejos de fertilización, y riego. Se recoge en las épocas de cosecha y posteriormente se somete a un proceso de adecuación para que pueda ser comercializado (C. Oliveros Tascón et al., 2015)(Curo, 2013).

**Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Es un parámetro de la cantidad de oxígeno que se necesita para la oxidación aerobia de la materia orgánica biodegradable presente en el agua. Es uno de los indicadores más importantes en la medición de la contaminación en aguas residuales (Raffo Lecca et al., 2014).

**Fruto vano:** Hace referencia a los granos defectuosos, es decir, son frutos que presentan defectos en la semilla, algunos de estos defectos son los granos negros, agrios o marrones, inmaduros, dañados por insectos y/o con daños físicos, los cuales disminuyen drásticamente la calidad del café (Fajardo, 2019).

## Resumen

**Título:** Estado del Arte de la Disminución de la Huella Hídrica Mediante el Diseño Sustentable del Beneficio Húmedo del Café\*

**Autor:** Jose Luis González Ipuz y Laura Juliana Vega Rojas \*\*

**Palabras Clave:** Café, Contaminación, Aguas miel (mucílago), Pulpa de café, Beneficio de café.

**Descripción:** El proceso convencional de beneficio de café en Colombia, es por vía húmeda; siendo característico su alta huella hídrica ya que requiere para el lavado, altas cantidades de agua que finalmente salen contaminadas y por ende es una de las principales problemáticas del sector cafetero, pues se requiere un control para el vertimiento de estas aguas mieles. En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo realizar un estudio de vigilancia científico-tecnológica a las investigaciones y avances técnicos que mitiguen el impacto ambiental producido por el beneficio del café. Para dar cumplimiento al propósito, se realizó una búsqueda y selección de artículos científicos dispuestos en bases de datos, considerando la literatura originada entre 2001 y 2021. Posteriormente, se efectuó un análisis bibliométrico de los documentos seleccionados, contemplando como contenido de interés, las diferentes etapas del beneficio húmedo, el café Honey, el beneficio ecológico y el tratamiento de aguas mieles, mucílago y pulpa. De esta manera, este documento evidencia una recopilación de información descriptiva e interdisciplinaria acerca del proceso de beneficio húmedo de café, las alternativas para cada una de las etapas y el manejo de residuos. Finalmente, mediante el análisis de la información recopilada, se concluye que existen alternativas sostenibles para el beneficio del café, que pueden ser implementadas por los pequeños y medianos caficultores a bajos costos y de fácil acceso frente a las alternativas ofrecidas por Cenicafé; las cuales generan un valor agregado al producto final, pues estos procesamientos permiten obtener un café de alta calidad y certificado.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: M. Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira. Ingeniero Químico M. Sc.

### Abstract

**Title:** State of the Art of the Reduction of the Water Footprint Through the Sustainable Design of the Wet Coffee Mill\*

**Author(s):** Jose Luis González Ipuz y Laura Juliana Vega Rojas \*\*

**Key Words:** Coffee, Contamination, Honey water (mucilage), Coffee pulp, Processing of coffee.

**Description:** The conventional process of coffee processing in Colombia is wet; being characteristic of its high-water footprint since it requires washing, high quantities of water that finally come out contaminated and therefore is one of the main problems of the coffee sector, since a control is required for the discharge of this Honey water. In this sense, the objective of the present work is to carry out a study of scientific-technological surveillance of the research and technical advances that mitigate the environmental impact produced by the coffee processing industry. In order to fulfill this purpose, a search and selection of scientific articles in databases was carried out, considering the literature that originated between 2001 and 2021. Subsequently, a bibliometric analysis of the selected documents was carried out, contemplating as content of interest, the different stages of the wet mill, Honey coffee, the ecological mill and the treatment of water, Honey, mucilage and pulp. In this way, this document evidences a compilation of descriptive and interdisciplinary information about the wet milling process of coffee, the alternatives for each of the stages and the management of residues. Finally, through the analysis of the information gathered, it is concluded that there are sustainable alternatives for the processing of coffee that can be implemented by small and medium coffee growers at low costs and of easy access compared to the alternatives offered by Cenicafé; which generate an added value to the final product, since these processes allow obtaining a high quality and certified coffee.

---

\* Degree Work

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: M. Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira. Ingeniero Químico M. Sc.

## Introducción

En Colombia, el cultivo del café tiene una importancia social relevante, pues es uno de los principales productos de exportación y según las cifras del 2019-2020, la producción Colombiana correspondió al 0,7% del PIB del país, es decir, 14,3 millones de sacos (Clavijo, 2019). No obstante, en el proceso de producción de café, el agua se ve envuelta en una gran problemática, ya que en las prácticas tradicionales del proceso de beneficio húmedo, se estima un consumo de agua entre los 40 y 60 litros para la obtención de 1 kg de café pergamino seco (c.p.s.) (Fernández Cortés et al., 2020).

Ahora bien, el elevado impacto al recurso hídrico, es producto de la selección, despulpado, fermentación y lavado del grano, generando aguas compuestas de diferentes tipos de azúcares, un pH ácido y una alta cantidad de materia orgánica que ocasiona un aumento considerable en la demanda biológica de oxígeno (DBO) y malos olores por aguas residuales (Fernández Cortés et al., 2020). Éstas se denominan aguas mieles, las cuales, en muchas ocasiones son vertidas a diversas fuentes hídricas generando un alto impacto ambiental, ya que por su naturaleza y composición resultan nocivas para los sistemas acuíferos (Torres-Valenzuela et al., 2019).

Pese a que Cenicafé y diversos centros de investigación han estudiado y desarrollado tecnología para el tratamiento de aguas mieles o alternativas del proceso del beneficio del café; su implementación no es masiva debido a diversos factores, principalmente el económico (Alvarez Martinez et al., 2015). Algunos ejemplos los representan el beneficio semiseco o Honey que incorpora el procesamiento sin uso de agua y la obtención de subproductos que puedan ser valorizados con mayor factor de conversión del producto principal; también se encuentra el desarrollo de tecnologías como el proceso BECOLSUB del cual, se han generado diversas modificaciones, todas en torno a la reducción del consumo de agua y el tratamiento de las aguas

utilizadas mediante tecnologías como biofiltros, filtros percoladores que a través de biomasa se construye un lecho de oxidación biológica para aguas residuales, u otras alternativas como los Sistemas de Biodigestión y Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA) que remueve la contaminación presente en las aguas residuales producidas por el mucílago y el uso de humedales artificiales que representa una alternativa viable, simple de operar y de mantenimiento económico (Campos Morales et al., 2019). Así pues, con el fin de continuar y enriquecer el proceso investigativo, el presente trabajo surge de la necesidad de exponer un proceso de beneficio de café sustentable para pequeñas y medianas fincas principalmente, y además, se centre en la disminución de la huella hídrica.

En este sentido, el desarrollo de este trabajo se focaliza en el interrogante de ¿qué alternativas científicas y tecnológicas se han desarrollado para un beneficio húmedo sustentable? Para responder a esta pregunta se propone el estudio de las etapas, condiciones y alternativas del beneficio húmedo del café, la identificación de la huella hídrica del proceso y las opciones para reducirla, además de proponer un diseño sustentable del beneficio de café. Por lo cual, este documento ilustra la recopilación de información descriptiva e interdisciplinaria de una de las problemáticas del sector cafetero como lo es la contaminación ambiental generada por el proceso de beneficio húmedo de café y se espera que los resultados obtenidos en este proyecto de grado, contribuyan a la base de futuras investigaciones.

## 1 Marco Teórico

Para la comprensión de este estudio, es necesario enfatizar en algunos conceptos relacionados a la producción cafetera; en especial, generalidades del proceso y de las etapas del beneficio húmedo del café, de igual manera, se requiere resaltar las problemáticas ambientales asociadas al mismo, por lo cual, se detallan conceptos asociados a la disminución de la huella hídrica, siendo este el enfoque del presente proyecto.

### 1.1 Huella hídrica

La Huella Hídrica (HH) es un indicador del consumo y contaminación de agua dulce, que contempla las dimensiones del uso directo e indirecto del recurso. Este indicador se puede analizar identificando los componentes básicos, los cuales son volumen, color/clasificación del agua, lugar de origen y momento de la extracción (Arreguín Cortés et al., 2007), y se clasifica en:

#### 1.1.1 *Huella hídrica verde*

Hace referencia al volumen de agua lluvia que no se transforma en escorrentía, por lo que se acumula en superficies permeables y de esta forma, alimenta la demanda existente en la vegetación. Por lo general, son aguas subterráneas poco profundas que cumplen con el ciclo del agua por medio de la evapotranspiración (Arévalo Uribe, 2012) (Arévalo Uribe et al., 2011).

#### 1.1.2 *Huella hídrica azul*

Se define como el volumen de agua extraído de una fuente hídrica superficial o subterránea, su uso es dado para la producción de bienes o servicios, cubriendo la demanda insatisfecha de agua dada por poca disponibilidad del agua procedente de la lluvia (Arévalo Uribe et al., 2011).

### **1.1.3 Huella hídrica gris**

Se considera como el volumen de agua necesario para que el receptor reciba el vertido contaminante del resultado de la cadena de producción sin que la calidad del recurso hídrico supere los límites establecidos por la legislación vigente (Arévalo Uribe, 2012) (Arévalo Uribe et al., 2011).

La huella hídrica de producción agrícola en Colombia es liderada por el café que es el producto con mayor consumo hídrico (22%), seguido del maíz (13%), arroz (12%) y plátano (11%). El consumo de los recursos hídricos está asociado a las actividades de riego, fertilización, manejo y transporte de los cultivos, mantenimiento y procesos de postcosecha (Romero et al., 2016). En el apéndice A, se observa que el cultivo del café junto con el de maíz, arroz y plátano suman casi el 50% de la huella hídrica por año.

## **1.2 Composición del café**

El fruto de café es carnoso y de color verde inicialmente, no obstante al madurar, el fruto se torna de un tono rojo o púrpura; el cual se conoce como cereza de café y se caracteriza por tener forma ovalada o elipsoidal ligeramente aplanada, así como por estar conformado desde su interior al exterior por endospermo (semilla), espermoderma (película plateada), endocarpio (cascarilla), mesocarpio (mucílago), epicarpio (cáscara, pulpa) (Gómez, 2010). La composición de la cereza de café se ilustra en el apéndice B.

## **1.3 Beneficio del café**

El fruto maduro del café, una vez cosechado, es un material perecedero, por lo cual, debe transformarse rápidamente a café pergamino seco, con humedad del 10 al 12%, base húmeda, para preservar su calidad (C. Oliveros Tascón et al., 2015). A este proceso se le conoce como beneficio

de café, siendo el beneficio convencional por vía húmeda el proceso que tradicionalmente se ha utilizado en Colombia (Arango Restrepo, 1999).

#### **1.4 Etapas del beneficio húmedo del café**

##### **1.4.1 Cosecha del fruto**

La recolección es la actividad en donde se recoge el fruto del café. Cabe recalcar que, para obtener un café de cualidades sobresalientes, la recolección es de forma selectiva, sólo así se logra un café verdaderamente homogéneo garantizando el máximo rendimiento y calidad del producto. En este sentido para esta fase se deben recolectar los frutos en su punto óptimo de maduración (color rojo brillante) y evitar los frutos deficientes (verdes, sobre madurados o defectuosos).

##### **1.4.2 Transporte al beneficiadero**

El café es llevado al sitio donde se realiza el proceso de beneficio, este traslado se efectúa manualmente para las producciones pequeñas; las medianas y grandes emplean ayuda de maquinaria (Arango Restrepo, 1999).

##### **1.4.3 Selección de las cerezas**

El café cosechado, se encuentra mezclada con frutos de diversos estados de maduración, frutos afectados por enfermedades así como de calidad deficiente (secos y “brocados”) y residuos de la cosecha (rocas, ramas, vegetación); por lo cual, es necesario separar las cerezas de café aptas para el beneficio, con la finalidad de no alterar el despulpado. El proceso tradicional se fundamenta en la diferencia de densidades (Barrios Orozco, 2018; D’Areny, n.d.).

#### **1.4.4 *Despulpado***

Es la actividad donde se separa la pulpa roja o amarilla (exocarpio) presente en el grano recubierto del mucílago (Arango Restrepo, 1999), es realizado por máquinas despulpadoras que trabajan mediante esfuerzo de corte y compresión (Mantilla Duarte, 2019).

#### **1.4.5 *Desmucilaginado***

El mucílago es una capa gelatinosa componente del café, y es necesario su retiro para mejorar el proceso de secado y disminuir la carga microbiana (Mantilla Duarte, 2019). Existen diversas alternativas para remover el mucílago, sin embargo, la forma tradicional involucra medios naturales (fermentación).

#### **1.4.6 *Lavado***

El lavado se efectúa con el fin de eliminar los productos de la fermentación. Los cafés lavados, tienen como característica que las enzimas puedan trabajar mejor, generando una mayor absorción y concentración de azúcares en el grano (Solano Valencia, 2014).

#### **1.4.7 *Secado***

El proceso de secado consiste en disminuir el contenido de humedad de los granos de café desde un 55% hasta un 10-12%, eliminando así los riesgos con la respiración, oxidación, fermentaciones y el desarrollo de hongos y bacterias, durante el almacenamiento para su posterior comercialización. El secado natural se da exponiendo el grano a la radiación solar y al viento por medio de marquesinas, en patios de asoleo o carros secadores, entre otras (Mantilla Duarte, 2019). Cabe resaltar que el secado uniforme se consigue esparciendo el café en capas de 3 cm de grosor (Barrios Orozco, 2018). Sin embargo, el secado también puede ser mecánico, empleando silos principalmente.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Realizar un estudio de vigilancia científico-tecnológica relacionado con el desarrollo de tecnología que mitigue el impacto ambiental producido por el beneficio del café.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Realizar un análisis bibliométrico de las publicaciones científicas relacionadas con las etapas, condiciones y alternativas del beneficio húmedo del café junto a la huella hídrica generada en este proceso.

Especificar los avances científicos y tecnológicos relevantes en el desarrollo técnico del proceso de beneficio de café, que mitigue el impacto ambiental y huella hídrica.

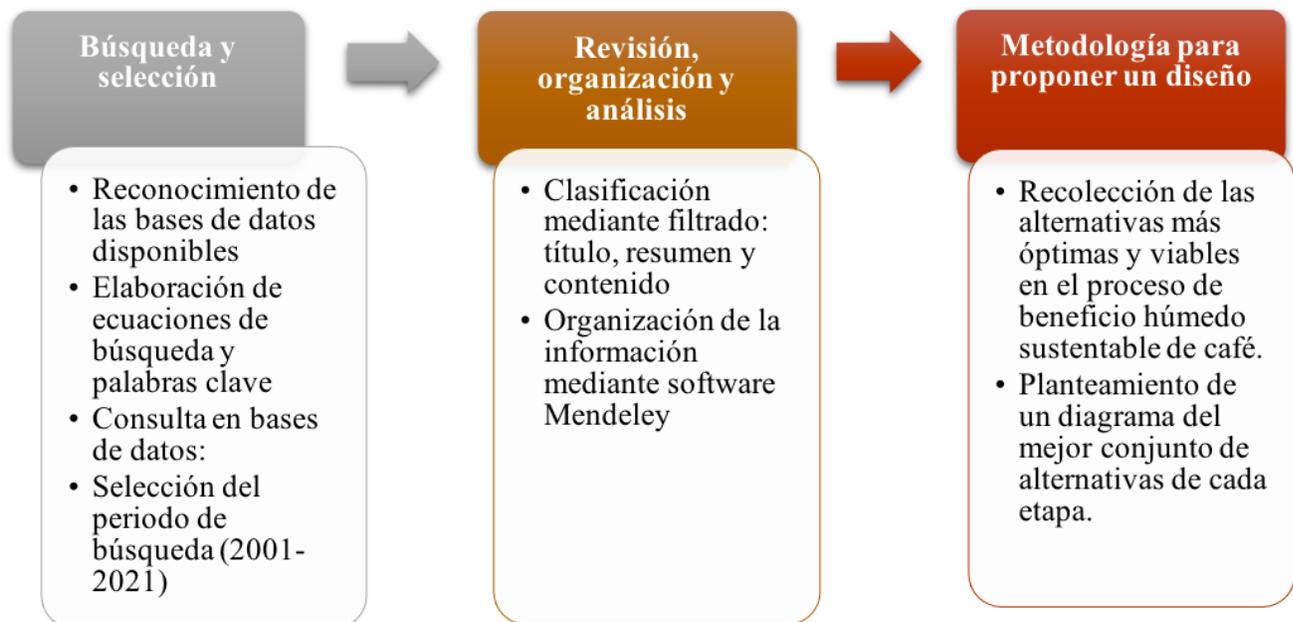
Identificar los desafíos actuales relacionados con la mitigación de la huella hídrica en el proceso de beneficio de café, generando la base para el planteamiento de futuras propuestas de investigación.

### 3 Metodología

La metodología empleada para el desarrollo de esta investigación se realizó en 3 etapas: i) búsqueda y selección; ii) revisión, organización y análisis; iii) metodología para proponer un diseño; como se ilustra en la figura 1.

#### Figura 1.

*Esquema de la descripción metodológica del proyecto*



*Nota.* Etapas de la metodología empleada en el proyecto junto a sus respectivas actividades.

#### 3.1 Búsqueda y selección de artículos científicos en la base de datos

La búsqueda y recopilación de la información se realizó empleando bases de datos de referencias bibliográficas (cuyo acceso es proporcionado por la Universidad Industrial de Santander), tales como Scopus, Virtual Pro y Web of Science; en las cuales, se emplearon las ecuaciones de búsqueda (ver apéndice C y D) generadas con las siguientes palabras clave: beneficio húmedo, procesamiento de café, beneficio Honey, lavado, desmucilaginado,

clasificación, selección, despulpado, huella hídrica, fermentación, secado y secado solar, buenas prácticas. En cuanto al proceso de recolección de la información, se llevó a cabo en los idiomas inglés y español según lo requerido por la base de datos, y se enfocó principalmente en artículos científicos, trabajos de grado y libros, publicados desde el año 2001 hasta la actualidad, dando cumplimiento a los objetivos establecidos.

### **3.2 Revisión, organización y análisis de los documentos seleccionados**

La información recopilada se clasificó y organizó de acuerdo con los objetivos del presente estudio, así como, el criterio de los autores involucrados en el mismo. En el proceso de revisión de los artículos, se realizaron 3 filtros para obtener las investigaciones de interés para este trabajo.

#### **3.2.1 Filtro por título**

Se descartaron los títulos que no estuvieran relacionados con beneficio húmedo del café y/o las etapas de este proceso, además del manejo de residuos.

#### **3.2.2 Filtro por resumen**

Se realizó la lectura del resumen de cada artículo para seleccionar aquellos que estuvieran relacionados con beneficio húmedo del café y/o las etapas de este proceso, además del manejo de residuos.

#### **3.2.3 Filtro por contenido**

A los artículos seleccionados por resumen, de forma semejante al parámetro anterior, se le realizó una revisión del contenido, teniendo como criterio el manejo del recurso hídrico, beneficio húmedo del café y/o las etapas de este proceso, además del manejo de residuos. Seguidamente se realizó una clasificación por temas a toda la información obtenida de los filtros previamente realizados, es decir, de acuerdo con su contenido y/o temática en el cual se enfoque el escrito.

Finalmente, la organización de los artículos seleccionados se realizó mediante el gestor bibliográfico Mendeley, al cual se anexaron las carpetas con los documentos clasificados para obtener la información como autores, año de publicación, resúmenes, palabras claves, DOI y revista o institución de publicación. De igual manera, se extrajo la bibliografía correspondiente con esta herramienta.

### **3.3 Metodología para proponer un diseño**

Finalmente, para dar cumplimiento al tercer objetivo, se seleccionaron los avances tecnológicos para cada etapa en el beneficio húmedo del café, así como las alternativas en cuanto al proceso del beneficio convencional de café; para ello, se empleó como criterios la relación costo beneficio y el enfoque hacia los objetivos de desarrollo sostenible; generando finalmente un diseño de beneficio sustentable y viable que genere café pergamino seco de alta calidad.

## **4 Resultados**

### **4.1 Selección del fruto de café**

La conservación de la calidad del café colombiano requiere que los frutos maduros representen el 98% de la masa cosechada. Sin embargo, la problemática actual se encuentra en que la proporción de frutos maduros en una rama es inferior al 60%, debido a esto, se requiere una selección del fruto, siendo tradicional el método manual; en donde la eficiencia por persona es de 10 kg de frutos desprendidos por hora y representa el requerimiento de mano de obra más grande, correspondiente al 35 - 42% de los costos totales de producción (Sandoval et al., 2009).

#### **Tabla 1**

*Descripción de métodos de selección del café*

Método	Descripción	Fundamento
Separador hidráulico de tolva y tornillo sin fin (SHTS)	Tolva de precipitación y un transportador de tornillo sin fin inclinado y ubicado en la base para extraer del fondo de la tolva el material decantado.	Los frutos de café con impurezas llegan a la tolva llena con agua limpia, permitiendo que los frutos de baja calidad junto a impurezas floten (menor densidad) y los de mayor densidad (piedras, puntillas) precipiten en el fondo. Aquí, los frutos aptos son atrapados por el tornillo sin fin (C. Oliveros Tascón et al., 2007).
La separación por flotación	Técnica más tradicional, inmersión en un tanque lleno de agua. También se han desarrollado canaletas para efectuar la inmersión.	Se realiza una inmersión de la masa de café en agua para promover la flotación de los frutos de café no aptos, los cuales son separados por arrastre superficial manualmente (C. Soto, 2010).
La criba de flotes	La criba recibe por un extremo el rebalse del sifón, permitiendo que entre los espacios de las ranuras se escape el fruto indeseable con el agua de arrastre, y el fruto de tamaño normal, salga por el otro extremo de la criba.	La clasificación de los frutos vanos y secos se genera por la diferencia de tamaños respecto a los frutos aptos los cuales se sumergen y son arrastrados hacia un tubo que succiona el agua y el café desde el fondo del tanque hasta alimentar al despulpador (C. Soto, 2010).
Método manual: bandas o mesas	Las bandas transportadoras y/o las mesas seleccionadoras (mesas con lámpara superior fluorescente), permiten que la mano de obra se disponga alrededor de estos y realicen el proceso de selección. El café seleccionado cae en sacos al final de la banda o debajo de la mesa.	Los frutos de café se disponen en bandas transportadoras (método automatizado) o mesas (método artesanal) y son seleccionadas a criterio del personal (C. Oliveros Tascón et al., 2015).
Máquina JMEstrada 2500	Tiene capacidad de flujo de café cereza en el rango de 1.500 a 2.500 kg/h con recepción máxima inicial de frutos verdes del 4-10%. La máquina también cuenta con una despulpadora convencional.	Esta máquina es apropiada para separar frutos verdes, con una eficacia promedio de 98,3%, sin causar daño mecánico a los granos (C. Oliveros Tascón et al., 2010).

Medición de color con sensor de color	Se basa en la representación del color Hue-SaturationValue (HSV), que analiza las diferencias de los estados de maduración en el plano de las componentes “hue” (Matiz) y “saturation” (Saturación) ( <i>hs</i> ), y emplea un algoritmo sobre el plano <i>hs</i> para la clasificación.	El sistema de identificación logró eficiencia mayor al 95% para todos los estados de maduración, independiente de la velocidad de exposición de los frutos frente al sensor de color (Ramos Giraldo et al., 2010). El estudio se expone en el apéndice E.
Procesamiento de imágenes para la clasificación de café	Consiste en el procesamiento de imágenes con respecto a sistemas de tipo óptico o electromecánico. El análisis de imágenes se centra en la distribución de la intensidad y homogeneidad de los colores, el análisis de la rugosidad de la epidermis y la forma elipsoidal-esférica de los granos.	Sistema de análisis de tamaño, forma y color del fruto a partir del procesamiento de imágenes, clasificando los frutos según el estado de maduración. Se obtiene más del 98% de frutos maduros (Sandoval Niño et al., 2007).

*Nota.* Tecnologías empleadas en la clasificación del café con su descripción operacional.

## 4.2 Despulpado

Es la operación de trillado del café mediante el estrujamiento del fruto entre dos superficies. Cabe destacar que es de gran importancia la previa selección, ya que, si el mucílago no se encuentra plenamente desarrollado el grado puede sufrir daño mecánico como picaduras, cortaduras y partición. Además, la poca uniformidad del tamaño de las cerezas y grado de maduración puede afectar el funcionamiento del equipo despulpador o generar daños mecánicos de mayor tamaño. Por otro lado, se ve afectada la calidad del producto por el mantenimiento de las cuchillas y/o pecheros del despulpado. A continuación, se presentan los equipos de despulpado convencional (C. Soto, 2010).

### Tabla 2

*Equipos de despulpado convencional*

Equipo	Descripción	Fundamento
Despulpadora de cilindro horizontal	Consiste en un cilindro horizontal giratorio, recubierto por una lámina (camisa) con protuberancias (“dientes” o “uñaas”). Para el proceso de café de calidad diferenciada, los pulperos más adecuados son los de cilindro horizontal con pechero de hule.	Los frutos de café caen sobre el cilindro (en rotación), confrontando la pechera contra la cual son estrujados y sometidos a un esfuerzo cortante (cizalladura), de modo que las fuerzas de presión y fricción provocan el desprendimiento de la pulpa. Los granos y la pulpa van por caminos separados, ya que, las uñas agarran la pulpa y la sueltan en la parte posterior de la máquina por efecto de la fuerza centrífuga.
Despulpador de pechero de hierro	Construido de modo similar al de pechero de hule, el despulpador de pechero de hierro se diferencia porque el elemento que presiona el grano contra el cilindro es una plancha cóncava de metal llamada pechero.	La acción de estrujamiento del fruto incluye el corte de la pulpa. El pechero de hierro puede actuar como una cuchilla. Se aplica pues, un despulpado riguroso.
Despulpador de discos	Consiste en uno a cuatro discos de fundición, montados en un eje horizontal. Los discos tienen proyecciones redondeadas, de forma y distribución variable según el tipo de café a procesar.	Las botonaduras del disco arrastran el café hasta las barras o crestas despulpadoras, que separan la cáscara. El proceso continúa en las cuchillas fijas, impidiendo el paso de los granos, pero permitiendo la salida de la cáscara de pulpa.
Despulpador de Cilindro Vertical	El rotor es un cilindro vertical, recubierto por una camisa de acero inoxidable con botonaduras. El despulpador tiene 6 pecheros helicoidales. Se puede colocar un manubrio para operación manual. Es una máquina pequeña y liviana, fácil de transportar e instalar en lugares lejanos (incluyendo aquellos sin electricidad).	El canal tiene una profundidad progresivamente menor desde la entrada del café, hasta la descarga. De esta manera las cerezas grandes se despulpan en la entrada, las normales más abajo, y las pequeñas al final. Esta se caracteriza por ser igualmente eficiente con cafés de distintos tamaños.

*Nota.* Descripción de los tipos de despulpadoras convencionales. Adaptado de (C. Soto, 2010) (Boyacá Vásquez, 2018).

### **4.3 Desmucilaginado**

El mucílago, representa en promedio el 22% en peso del café despulpado y su exposición descontrolada en la semilla de café genera la manifestación de olores y características físicas indeseables durante el secado, siendo estos los defectos conocidos como fermento y vinagre en la bebida, lo cual implica disminución en la calidad del café (Torres Ocampo, 2013). En este sentido, existen dos formas de realizar el beneficio húmedo del café, el convencional y el mecánico. El primero de ellos, aprovecha la fermentación natural del mucílago para facilitar su eliminación con un posterior lavado y el segundo, retira el mucílago mediante la agitación y colisión entre los granos por medio de desmucilaginadores mecánicos, además entregan el café lavado. No obstante, en este capítulo sólo se aborda el lavado que requiere fermentación (beneficio convencional).

#### **4.3.1 Fermentación**

La fermentación natural en el beneficio húmedo convencional ha permitido la degradación del mucílago del café para facilitar su remoción. Siendo el mucílago una sustancia rica en azúcares y agua, las enzimas (pectinasas y pectasas) junto a microorganismos, principalmente bacterias (pectinolíticas) propias del café, transforman los azúcares en alcoholes y ácidos orgánicos solubles en agua que se remueven en el lavado posterior. Cabe destacar que, del control de las variables como el tiempo, temperatura y calidad tanto del café despulpado como del agua empleada, son el resultado de la calidad en taza (Oliveros-Tascón et al., 2011) (Boyacá Vásquez, 2018). La fermentación tarda entre 14 a 18 horas, tal como lo indica Do Carmo et al., (2020) en su estudio sobre los tiempos de fermentación, en donde encontró que los mejores análisis sensoriales los representó el café fermentado durante 18 horas (Do Carmo et al., 2020). Además, la fermentación al ser un proceso exotérmico (consecuencia del metabolismo de las células), es necesario controlar la temperatura, de lo contrario se pueden generar sabores indeseables en la bebida final. Agámez

Hernández (2017), estudió la implementación de un sistema de automatización a un biorreactor de fermentación de café, enfocándose en el sistema de enfriamiento de este, con la finalidad de evitar alteraciones en la calidad del café (apéndice F)(Agámez Hernandez, 2017).

#### 4.3.2 *Lavado*

En el beneficio convencional, luego de la fermentación se requiere de un lavado para eliminar el mucílago que cubre el pergamino y los residuos de la fermentación. Los métodos que requieren previa fermentación, se presentan en la tabla 3, muchos de los cuales a su vez, realizan la clasificación del café según su calidad, en donde su principio fundamental es la diferencia de densidades, siendo los granos más densos los de mejor calidad (Torres Ocampo, 2013). No obstante, este tipo de lavado emplea grandes cantidades de agua por kg c.p.s. y los residuos generan inconvenientes ambientales debido a la alta carga orgánica que contiene y la demanda de oxígeno requerido para su degradación, afectando no solo los sistemas acuíferos en donde generalmente son dispuestos sin ningún tratamiento sino también afectando la flora y fauna acuática, provocando un impacto directo sobre los ecosistemas a su alrededor, además de las afecciones paisajísticas y la calidad de vida de las personas por contaminación al recurso hídrico (Alvarez Martinez et al., 2015).

**Tabla 3**

*Descripción de métodos de lavado con consumo de agua*

<b>Método</b>	<b>Descripción</b>	<b>Consumo de agua</b>	<b>Proceso</b>
<b>Canales de correteo</b>	Canales de 0,3 m a 0,4 m de ancho, con trayectorias entre 10 m y 40 m.	El café es transportado por medio del agua, siendo el consumo específico de agua, alrededor de 20L/kg c.p.s.	El mucílago fermentado se remueve mediante la agitación manual de la masa durante el recorrido del canal, en algunos puntos se ubican compuertas para clasificar el café

<b>Canales semisumergidos</b>	<p>Canales de 0,2 m de ancho de sección rectangular, con longitudes que van desde 2 m a 3 m, en el fondo hay perforaciones separadas entre sí aproximadamente 0,5 m.</p>	<p>El consumo específico de agua, cuando no se hace recirculación, es de 6,4 L/ kg cps.</p>	<p>El mucílago fermentado se remueve mediante la agitación manual de la masa durante el recorrido del canal, por el fondo se evacúa el café de buena calidad mientras los flotes continúan el recorrido</p>
<b>Tanques de fermentación</b>	<p>Tanques de fermentación que tienen las esquinas redondeadas; conocidos como tanques tina.</p>	<p>Este método tiene un consumo específico de agua de 4,17 L/kg cps y es posible la contaminación del café en un 86%.</p>	<p>El café se cubre completamente con agua y mediante la agitación se remueve el mucílago, este procedimiento se repite 4 veces y la clasificación del café se da cuando los frutos no aptos flotan en la parte superior y son retirados manualmente.</p>
<b>Hidrociclón</b>	<p>Dispositivo que permite lavar y retirar las impurezas del café bajo presión utilizando una bomba sumergible.</p>	<p>El consumo específico de agua (con recirculación) promedio de este equipo es de 3.8 L/kg cps</p>	<p>La suspensión agua y café con mucílago fermentado rota alrededor del eje longitudinal del hidrociclón formando un remolino que arrastra el café de buena calidad hacia las paredes, evacuándolos por la parte inferior. Los granos de menor calidad son arrastrados hacia un remolino interior ascendente con descarga superior.</p>

*Nota.* Identificación del proceso y consumo de agua de los métodos convencionales de lavado. Adaptado de (Torres Ocampo, 2013).

#### 4.4 Secado

La etapa de secado es de gran importancia debido a que tiene gran influencia sobre la calidad del café pergamino seco; siendo el contenido de humedad máxima del 12 %. para esta

etapa la temperatura de secado recomendable es de 40 °C, ya que, para temperaturas mayores a 50°C los granos de café tienen poca tolerancia. El secado se da en 3 etapas: el oreado a velocidad constante (del 53 al 48% de humedad), el presecado o deshidratación (a velocidad decreciente pasa del 47,5 al 32,5% de humedad) y el secado que elimina el agua pseudoligada al grano (desde el contenido crítico de humedad libre 32 al 12%). Por otro lado, el secado puede ser mecánico o empleando la radiación solar, este último es el más amigable con el medio ambiente (Camacho Fonseca et al., 2015).

**Tabla 4**

*Defecto en el grano debido a las malas prácticas en el secado*

<b>Falla en la etapa</b>	<b>Defecto en el grano</b>
Falta de higiene en equipos y ambientes	Contaminado, mohoso, terroso
Cargas de secado altas y capas de grano gruesas	Decolorado, vetado, mohoso
Altas temperaturas en el secador, mayor a 50°C	Cristalizado
Prolongados tiempos de secado	Decolorado, vetado
Re-humedecimiento y amontonamiento	Re-humedecimiento y amontonamiento

*Nota.* Posibles afecciones que puede sufrir el grano durante el secado. Tomado de (Valencia Carrillo, 2017).

**Tabla 5**

*Descripción de los métodos de secado*

<b>SECADO SOLAR</b>	
<b>Método</b>	<b>Descripción</b>

---

Losas de concreto con cierta inclinación para desagüe y expuestos a la intemperie en donde el sol irradia directamente el café extendido sobre el suelo (en camas delgadas de máximo 5 cm de espesor). Aproximadamente cada 6 horas se está moviendo y esparciendo (volteo para uniformidad en el secado) usualmente con un rastrillo que maltrata el grano. Es posible que el grano vuelva a humedecer por la noche con la condensación del agua en el aire o cuando llueve. Además, el grano está expuesto a contaminación (Camacho Fonseca et al., 2015).

---

#### **Estudios asociados**

---

**Patios**

- ✓ Borém et al., (2008) se planteó buscar un mayor control de los parámetros de secado (temperatura del aire de secado, temperatura de la masa de grano, humedad relativa y flujo de aire), comparando el secado en terraza y el secado mecánico con aire caliente a 40°C y 60°C. Sus resultados indicaron que el tiempo de secado se ve afectado por diversos factores como tipos de secado y procesamiento; la conductividad eléctrica, la lixiviación de potasio, la acidez titulable total y la acidez grasa aumentan con el incremento de la temperatura de secado, además de que el secado a 60°C afecta negativamente la calidad del café (apéndice G).
  - ✓ En el 2018 se realizó un estudio comparativo por Santos et al., sobre el costo de construcción entre el patio de cemento, lodo asfáltico, cama suspendida, tierra, así como la interferencia de estos patios en la calidad sensorial y los cambios fisicoquímicos del café. Los resultados indicaron que el patio de lodo de cemento es una excelente opción desde un punto de vista económico y mejora la calidad del café, en comparación con el patio de tierra (apéndice G).
-

Estructura metálica con cubierta plástica transparente con orificios para circulación del aire, piso encementado y camas de secado a más de 60 cm del piso, compuertas enrollables de plástico transparente y una puerta de acceso interno. La radiación solar irradia la cubierta plástica, calentando el aire que circula naturalmente o empleando fuentes externas. El tiempo de secado desde el 53% de humedad hasta la humedad de comercialización (10 a 12%) varía entre 7 y 10 días, dependiendo de las prácticas empleadas y las condiciones climáticas que se presentaron durante el proceso. La cubierta con plástico permite aprovechar eficientemente la energía solar y del aire, y proteger al café de las lluvias, rocíos y contaminación ambiental durante el proceso de secado, siendo un secador solar directo de construcción simple y más económica. El costo, puede variar entre \$80.000 y \$100.000 por metro cuadrado (m<sup>2</sup>) y atiende las necesidades de caficultores con producción anual de hasta 200@ c.p.s. Suele ser utilizado para el secado total o en combinación con secado mecánico en fincas de mayor producción, generando un ahorro importante de energía (eléctrica y térmica), reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y de partículas.

Los inconvenientes que presenta radican en el sobrecalentamiento del producto, la calidad indeseable y la limitada capacidad de secado. Además, los materiales usualmente empleados en la cubierta son de corta duración (1 a 3 años) (Briceño-Martínez et al., 2020)(Carlos E Oliveros Tascón et al., 2017).

---

#### Estudios asociados

---

- ✓ Construcción de secadores solares tipo túnel con nuevos materiales (Carlos E Oliveros Tascón et al., 2017)

Proponen como alternativas el empleo de tubería de hierro de bajo peso para la estructura de la cubierta y el plástico reforzado utilizado en invernaderos, (plástico reforzado Europlast y Agroplast). Igualmente, recomiendan que los tubos se recubran con una base anticorrosiva y luego con pintura blanca de aceite, para disminuir su calentamiento por la absorción de radiación solar, alargando la vida del plástico que entra en contacto directo con ellos. Como material alternativo para la construcción de la estructura de la cubierta se propone usar tubos conduit de hierro, fabricados en laminado en frío (cold-rolled) con costura soldada.

Análisis energético de un secador solar híbrido para secar café (Suherman et al., 2020) Se desarrolló un secador solar híbrido, con la luz solar como energía principal del proceso apoyado por medio de calentamiento adicional. Esta tecnología es renovable, respetuosa con el medio ambiente y económicamente sostenible para la mayoría de los países en desarrollo. El estudio concluye que los granos de café se secaron hasta un contenido de humedad final de 11% y una temperatura de secado más alta conducirá a una reducción de la humedad más rápida con tiempos de secado entre 15 a 16 horas, la cual puede variar según la condición geográfica y el factor de ubicación (apéndice H).

---

- ✓ Secador solar activo tipo invernadero (Briceño-Martínez et al., 2020)

El funcionamiento de los secadores solares está basado en el efecto invernadero, donde la energía solar es atrapada mediante colectores que elevan la temperatura del fluido. Se encontró que el tiempo de secado es de 5 días, reduciéndose el tiempo en un 40-50% aproximadamente, frente al secado en terraza. Además, tiene un incremento de la temperatura interior de 20 °C respecto a la temperatura ambiente, que genera una eficiencia global del secador solar estimada en aproximadamente 12%. (apéndice H).

- ✓ Secadores solares con sistema de flujo de aire continuo impulsado por energía fotovoltaica (Prada et al., 2019)

El objetivo de esta investigación fue reducir el tiempo de secado de café hasta obtener un promedio de 12% de humedad, empleando módulos secadores solares implementados con un sistema de flujo de aire continuo impulsado por energía fotovoltaica. Los resultados indicaron un tiempo de secado para los granos de café de 5 días en promedio, reduciendo la humedad hasta 12.29% (apéndice H).

## SECADO MECÁNICO

Secadores de cilindro  
vertical

Se basa en el principio de poner en contracorriente el flujo de aire caliente con una cascada de granos húmedos de café que descienden por gravedad y caen al fondo de la secadora donde son transportados nuevamente a la parte superior de la secadora a repetir el ciclo hasta obtener una humedad relativa de 11%. El tiempo de secado es de 36 – 39 horas y su capacidad es de 11.337 kg de café húmedo por tanda (Gallo et al., 2000). El café sufre daño mecánico por el roce con las paredes metálicas de los secadores (Camacho Fonseca et al., 2015).

Guardiolas o secador  
de tambor rotatorio

Se compone de un cilindro rotatorio con un conducto axial por donde circula aire caliente que es alimentado a los granos húmedos en su interior, permitiendo obtener uniformidad en el secado. Sin embargo, presenta baja eficiencia energética, complejidad en el manejo y construcción, alto costo y un prolongado tiempo de secado, aproximadamente 25 – 26 horas y su capacidad por tanda es de 3.637 – 3.773 kg de café (Gallo et al., 2000).

*Nota.* Funcionamiento de las alternativas de secado y estudios relacionados.

#### 4.5 Equipos integrados

Debido a las problemáticas ambientales que genera el beneficio convencional durante las etapas de fermentado y lavado principalmente; Cenicafé ha venido desarrollando tecnologías integradas que realizan el desmucilaginado con un bajo consumo de agua, además ejecutan otras etapas teniendo en cuenta los residuos generados, tal como se describe en la tabla 6. Respecto al lavado convencional en donde el consumo de agua es de al menos 5 L/kg c.p.s. (tabla 3), estos desmucilagadores mecánicos reducen la huella hídrica hasta un 98%, con consumos de agua inferiores a 1 L/kg c.p.s., dando como resultado el beneficio ecológico del café. No obstante, la implementación de estos equipos no representa más del 2% en el país, lo cual se debe a su alto valor comercial y a la complejidad de instalación de un sistema de tratamiento anaerobio como aprovechamiento económico de los residuos. Cabe resaltar de igual manera, que para los reactores anaerobios, los pequeños productores no se benefician porque la producción no es lo suficientemente grande para aprovechar el biogás (Garzón Martínez, 2020).

**Tabla 6***Desmucilagadores integrados*

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>
<b>DESLIM</b>	Equipo que desmucilagina y lava café o solamente lava. Emplea un agitador mecánico ubicado generalmente concéntricamente en una canasta o carcasa; consiste en generar esfuerzos cortantes (cizallamiento) y de compresión en el mesocarpio, ocasionados la colisión entre sí y contra partes de la máquina (rotor y carcasa). Su capacidad varía entre 100 a 3.000 kg de café cereza/h empleando de 0,4 L/min a 3,75 L/min (Torres Ocampo, 2013).
<b>BECOLSUB (Beneficiadero Ecológico y manejo de SUBproductos)</b>	Compuesto por una despulpadora convencional (despulpado sin agua), el módulo DESLIM (retira el mucílago y lava el café), y un transportador de tornillo sin fin inclinado (mezcla y transporta los subproductos pulpa, mucílago fresco y otros, hacia un depósito). Maneja un 90% la contaminación ocasionada por el proceso, la pulpa se lleva a fosa de compostaje o una cama de un lombricultura y el mucílago enriquece la pulpa. El consumo de agua varía entre 0,7 a 1,1 L/kg de cps (Torres Ocampo, 2013). Cuenta con capacidad para producciones desde 1.200 @ cps/año hasta 12.000 @ cps/año (Robledo Giraldo, 2020).
<b>ECOMILL</b>	Lava el café con fermentación natural o aplicando enzimas pectinolíticas, constituido por un depósito de almacenamiento de café con mucílago degradado, un transportador de tornillo sin fin (alimentador) y el mando central que consiste en la tecnología DESLIM con modificaciones en el rotor para procesar café con mucilago fermentado. Tiene capacidad desde 500 hasta 3.500 kg/h con duraciones de menos de 30 minutos (Torres Ocampo, 2013). Su consumo de agua oscila entre 0,35 y 0,6 L/kg c.p.s. El costo promedio de un tanque de fermentación de 1,5 m <sup>3</sup> para Ecomill 500, es de \$5.067.500 pesos colombianos, el cual representa cerca del 30,5% del costo total del equipo (Carlos Eugenio Oliveros Tascón et al., 2018).

*Nota.* Tecnología desmucilagadora desarrollada por Cenicafé para el beneficio ecológico

De acuerdo a la problemática económica que representa el acceso a estos equipos (superando los 15.000.000 COP en promedio para los equipos) estudios como el de (Alvarez Martinez et al., 2015) proponen diseños alternativos que se fundamentan en el beneficio ecológico

de café y que con una fácil operación resulta asequible a los pequeños caficultores; este estudio se profundiza en el apéndice I.

#### 4.6 Tratamiento de residuos

La resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, limita los valores permisibles en los vertimientos de aguas residuales generados en el sector cafetero. Además, las aguas mieles no son el único residuo generado durante el proceso de beneficio húmedo de café, la pulpa (40% en peso de la cereza) y el mucílago (22% en peso del café) también son subproductos, los cuales deben ser aprovechados eficientemente, ya que por cada kilogramo de fruto se producen en promedio 115,1 g de DQO, de los cuales el 73,7% (85 g) provienen de la pulpa y 26,3% (30 g) provienen del mucílago (Campos Morales et al., 2019) y por cada 100 kg de café se arrojan 68 kg de pulpa, cáscara y mucílago. A continuación, se presentan los diversos tratamientos y estudios asociados a cada residuo.

**Tabla 7**

*Aguas mieles como residuo del procesamiento de café*

<b>AGUAS MIEL</b>	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Son aguas generadas del beneficio húmedo, específicamente en el lavado y despulpado, se caracterizan por su alta carga de materia orgánica, nitrógeno amoniacal y fósforo. Su DQO generalmente es superior a los 7000 mg/L (Campos Morales et al., 2019). En este sentido, estas aguas suelen causar problemáticas ambientales como el daño a sistemas acuíferos, reduciendo el oxígeno disuelto del agua (eutrofización). Al comparar la concentración de materia orgánica del agua miel con la de las aguas negras urbanas (entre 500 a 1000 mg/L), resulta ser de 7 a 13 veces mayor (Acarley et al., 2020; Garay Román et al., 2014; Sandoval Salazar et al., 2021).
<b>TRATAMIENTO</b>	✓ Sistemas de Biodigestión y Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA) Sistema desarrollado por Cenicafé, compuesto por dos unidades que permiten la separación de las fases de la digestión anaerobia: el reactor Hidrolítico/Acidogénico (RHA) y el reactor Metanogénico (RM) (Campos Morales et al., 2019). Permiten

eliminar el 80.4 % de la carga orgánica inicial, sin embargo, los efluentes de los SMTA aún generan un impacto biológico y se requieren sistemas de postratamiento que disminuyan el 19,6 % restante en las aguas tratadas (Fernández Cortés et al., 2020).

- ✓ Lagunas de oxidación, infiltración por lechos porosos, filtros artesanales como biofiltros o filtros percoladores, tamizado y trampas, floculación y decantación que pueden ser procesos individuales y parciales (Alvarez Martinez et al., 2015; Campos Morales et al., 2019).

- ✓ Sistemas de tratamiento de aguas mieles de café en la Provincia de Rodríguez de Mendoza, Perú (Morales Rojas et al., 2020)

Estudio que evalúa tres sistemas de tratamiento de aguas mieles de café, mediante la comparación de un filtro físico, biológico y un sistema con coagulantes naturales. Los resultados indican que los filtros biológicos y la incorporación de coagulantes redujeron significativamente los valores de fosfatos y SDT, por lo que las aguas mieles tratadas con esta tecnología podrían ser empleadas en el riego agrícola (apéndice J).

- ✓ Aplicación del reactivo de fenton en el tratamiento de aguas residuales del desmucilaginado mecánico de café en la hacienda Majavita municipio de Socorro Santander (Arenas Estevez, 2016).

Durante la investigación se utilizó  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoestructurado, como catalizadores homogéneo y heterogéneo, a condiciones ambientales de temperatura y presión para disminuir el tiempo de arranque del SMTA. El estudio concluyó que los procesos de oxidación con el reactivo de Fenton es un tratamiento competente para aguas residuales de desmucilaginado del café empleando el catalizador homogéneo (apéndice J).

- ✓ Remoción de  $\text{DBO}_5$  y SS en sedimentador y lecho filtrante (Gutiérrez Guzmán et al., 2014)

El objetivo del trabajo consistió en evaluar la eficiencia expresada en porcentaje de remoción de los parámetros  $\text{DBO}_5$  y Sólidos Suspendidos (SS). Los resultados mostraron eficiencias de remoción de sólidos suspendidos superiores al 95% y remoción de  $\text{DBO}_5$  cercanas al 20%; para completar la remoción de  $\text{DBO}_5$  se recomienda completar con un tratamiento biológico con alguna especie de macrófitas (apéndice J).

---

*Nota.* Descripción, tratamientos y estudios para el manejo de aguas mieles.

**Tabla 8**

*Pulpa como residuo del procesamiento de café*

<b>PULPA</b>	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<p>Es el primer residuo generado durante el beneficio, que recubre la semilla de café y el mucílago. Para Colombia la media de generación de pulpa es 2,25 t/ha-año y por cada millón de sacos de 60 kg de café que Colombia exporta, se producen 162.900 t de pulpa fresca; en este sentido, si a este residuo no se le da un valor agregado, genera la contaminación equivalente a un año en excretas y orina en una población de 868.736 habitantes (Sarasty Zambrano, 2012).</p>
<b>TRATAMIENTO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Biocombustibles: la pulpa seca puede ser usada como combustible directo por su poder calorífico de 15,88 MJ/kg, pero, su secado mecánico implica más energía de la producida siendo ineficiente. También puede ser usado como biogás, presentando rendimientos de hasta 25 L de biogás por 1 kg de pulpa fresca y en la producción de bioetanol, mediante fermentación de la melaza extraída y concentrada de la mezcla pulpa-mucílago (Sarasty Zambrano, 2012).</li> <li>✓ Abono: el más usado en Colombia, utilizan directamente la pulpa como fuente fertilizante en sus cultivos de pancoger por su composición fisicoquímica que contiene cenizas, grasas, fibra, proteínas, nitrógeno, fósforo, potasio, elementos menores que ayudan a recuperar el suelo como fertilizante natural (Fernández Cortés et al., 2020).</li> <li>✓ Alimento animal: estudios en vacas lecheras y novillos, mostraron que la pulpa deshidratada y molida, administrada en combinación con concentrado y forraje (Sarasty Zambrano, 2012).</li> <li>✓ <i>Lombricompost</i>: con el fin de acelerar el proceso de transformación, las lombrices se encarga de fragmentar el sustrato, además de crear condiciones de humedad, ventilación y pH favorables a los microorganismos, que descomponen la pulpa y el mucílago en abono orgánico (Sarasty Zambrano, 2012). La lombriz Roja (<i>Eisenia foetida</i>) es la más adecuada para el aprovechamiento eficiente de estos subproductos, siendo ricos en azúcares y pectinas (Fernández Cortés et al., 2020) (Ramos Giraldo et al., 2010) (Apéndice L).</li> </ul>

*Nota.* Descripción, tratamientos y estudios para el manejo de la pulpa de café.

**Tabla 9**

*Mucílago como residuo del procesamiento de café*

<b>MUCÍLAGO</b>	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<p>Capa que se localiza entre la pulpa y el pergamino, constituida por tejidos halinos, se le confiere al mucílago una importancia industrial debido a su elevado contenido de azúcares y pectinas. El contenido del agua en el mucílago del café varía entre 85 y 90%. Se puede utilizar para diversos productos de interés económico, por ejemplo, la producción de miel, alcohol etílico, gas metano, entre otros (Fernández Cortés et al., 2020).</p>
<b>TRATAMIENTO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Alimento para cerdos: puede suplir hasta el 20% de concentrado por mucílago, sin afectar los requerimientos de nutrición del cerdo ni su rendimiento en producción de carne.</li> <li>✓ Digestión anaerobia (DA): proceso biológico natural en ausencia de oxígeno donde bacterias descomponen la materia orgánica en biogás que contiene principalmente, metano y dióxido de carbono. Como inóculos suele ser usados residuos biológicos, lodos, estiércol de ganado vacuno y porcino (Quintero Díaz, 2016).</li> </ul>
<b>ESTUDIOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Optimization and scale-up of coffee mucilage fermentation for ethanol production (Optimización y escalamiento de la fermentación de mucílago de café para la producción de etanol) (Orrego et al., 2018)</li> </ul> <p>Este estudio utilizó el mucílago debido a su composición química para la elaboración de etanol. El rendimiento máximo de etanol se obtuvo a una temperatura de 28 °C, pH 4.0, con una densidad celular inicial de 3 g/L, que alcanzó alrededor de 23 g/L de producción de etanol, correspondiente al 86,9% de rendimiento teóricamente alcanzable (apéndice M).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Utilizing coffee pulp and mucilage for producing alcohol-based beverage (Utilización de pulpa y mucílago de café para producir bebidas a base de alcohol) (Yadav et al., 2021)</li> </ul> <p>El estudio empleó la pulpa y mucílago de café para producir bebidas alcohólicas. Este estudio mostró que la pulpa y el mucílago del café podrían ser una materia prima nueva, valiosa y ecológica para la industria de bebidas y podría ayudar a reducir la amenaza ambiental (apéndice M).</p>

*Nota.* Descripción, tratamientos y estudios para el manejo del mucílago de café.

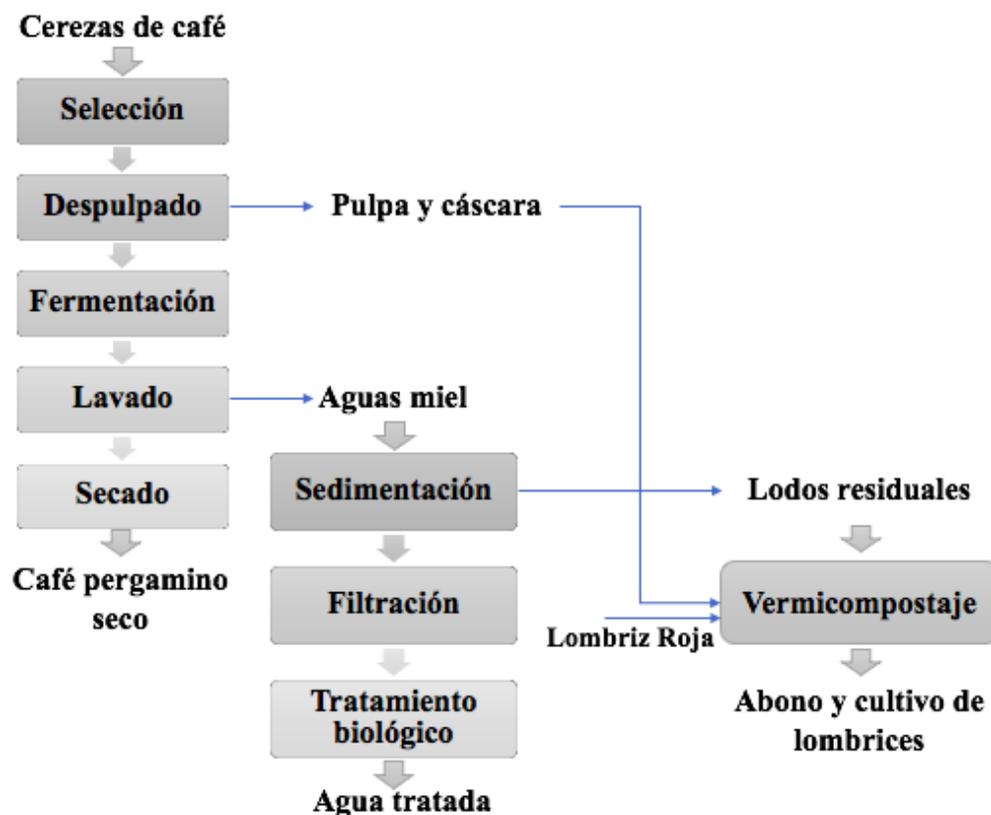
#### **4.7 Alternativas para el beneficio del café**

De acuerdo a la problemática de consumo de agua y huella hídrica expuesta para cada etapa del proceso y con base en los estudios y avances tecnológicos encontrados en la literatura, se plantea una alternativa para mitigar tal huella hídrica e impacto ambiental, la cual implica el

tratamiento de las aguas residuales (miel) producto del beneficio convencional de café, así como el manejo de los subproductos generados en este proceso. En este sentido, el esquema de procesamiento propuesto se ilustra en la figura 2. Cabe resaltar que la propuesta consiste en una alternativa que tiene en cuenta el poder adquisitivo de los pequeños y medianos caficultores, siendo de fácil implementación y manejo para estos productores, además de ser procesos eficientes y que se pueden adaptar al beneficio convencional.

**Figura 2**

*Diagrama de alternativa 1 para procesamiento de café.*



*Nota.* Esquemización para el tratamiento de aguas del beneficio de café convencional.

La propuesta consiste en tratar las aguas miel inicialmente con sedimentador para que decanten todas las partículas y a su vez formando lodos residuales, que posteriormente serán separados de la parte totalmente líquida, aguas que pasarán inmediatamente a un lecho filtrante

formado por arena y gravilla donde se removerá la mayoría de sólidos totales disueltos y en un pequeño porcentaje (cerca de 20%) el DBO (Gutiérrez Guzmán et al., 2014). Finalmente, al agua filtrada se le realiza un tratamiento biológico, el cual consiste en un humedal artificial, siendo característica una remoción de: DBO entre el 60 y 90%, coliformes del 99,99%, sólidos suspendidos del 60 al 90% de acuerdo a los estudios expuestos en el apéndice K (Garay Román et al., 2014) (Campos Morales et al., 2019). Por otro lado, los lodos se mezclan con la pulpa residual del despulpado para someter a vermicompostaje con lombriz roja, siendo esta la recomendada en los estudios de interés expuestos en el apéndice L (Quintero Díaz, 2016). Cabe resaltar que el beneficio convencional con menor consumo de agua es en el que se realiza la selección manual y con zarandas (sin agua), el despulpado y transporte sin consumo de agua y la fermentación y lavado en tanques tina, con un consumo de aproximadamente 4,5 L/kg c.p.s.

Por otro lado, una forma de beneficio alternativo al convencional, es el beneficio Honey o de vía semiseca. Siendo el mucílago en el beneficio convencional un residuo y principal contaminante de las aguas residuales; durante la búsqueda para la reducción de la huella hídrica e impacto ambiental generado en el procesamiento del café, se ha encontrado el aprovechamiento del mucílago durante el secado del grano, para imprimir un conjunto de expresiones sensoriales en taza como lo es un alto dulzor, así como, sabores frutales y caramelo, es decir, generando un café especial, por lo cual, la industria cafetera ha incursionado en el beneficio Honey.

## **Tabla 10**

### *Café Honey*

---

#### **CAFÉ HONEY**

---

<b>Descripción</b>	<p>El beneficio Honey o semi-lavado es el procesamiento en el cual el mucílago se seca sobre el grano hasta obtener un 10-12% de humedad; generando un café de origen único y sabor distintivo, reconocidos como café especiales (Mejia-Lotero et al., 2016). La apariencia final del pergamino de café Honey depende de la cantidad de mucílago con la que se va a secar el café y el grado de exposición al sol, por lo cual puede ser amarilla, roja o negra (Gonzales Díaz et al., 2019).</p>
<b>Tipos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Red Honey: se retira la pulpa y el grano se deja cubierto de mucílago, permitiendo que se adhiera al grano durante el secado al sol o con cubierta. El mucílago, seco adquiere un matiz rojizo, mayormente usado en América central.</li> <li>✓ Yellow Honey: mediante desmucilaginosos mecánicos se retira parte del mucílago y se procede al secado al sol, lo cual le genera tonos dorados o amarillos al pergamino, mayormente usado en centro América y Brasil.</li> <li>✓ Black Honey: los granos de café sobremaduros se les retira la pulpa y el mucílago se dispone al secado en el grano bajo cubierta. Cabe resaltar, que el contenido de azúcares en estos granos es superior por el estado de maduración. Como resultado se obtiene un pergamino oscuro, mayormente usado en Costa Rica (Gonzales Díaz et al., 2019).</li> </ul>
<b>Procesamiento</b>	<p>Una vez recolectado el café cereza estrictamente maduro, se despulpa mediante despulpadora tradicional (sin agua), seguidamente el café despulpado, se deja escurrir en una pasera durante 2 horas, y se procede a las paseras solares formando capas de 3 a 5 cm para iniciar el presecado por 18 horas al sol. Finalmente, para el secado es necesario un método con inyección de aire, para reducir la humedad al 10-12% y el grano no puede superar los 40°C. Cabe resaltar que el secado se debe realizar de forma lenta aplicando un movimiento constante y el mejor sistema es la cama africana o parcelas, por último, requiere un tiempo de reposo en bodega de mínimo 2 meses para maximizar el potencial sensorial en taza (Gonzales Díaz et al., 2019).</p>

**Comparación frente al convencional**

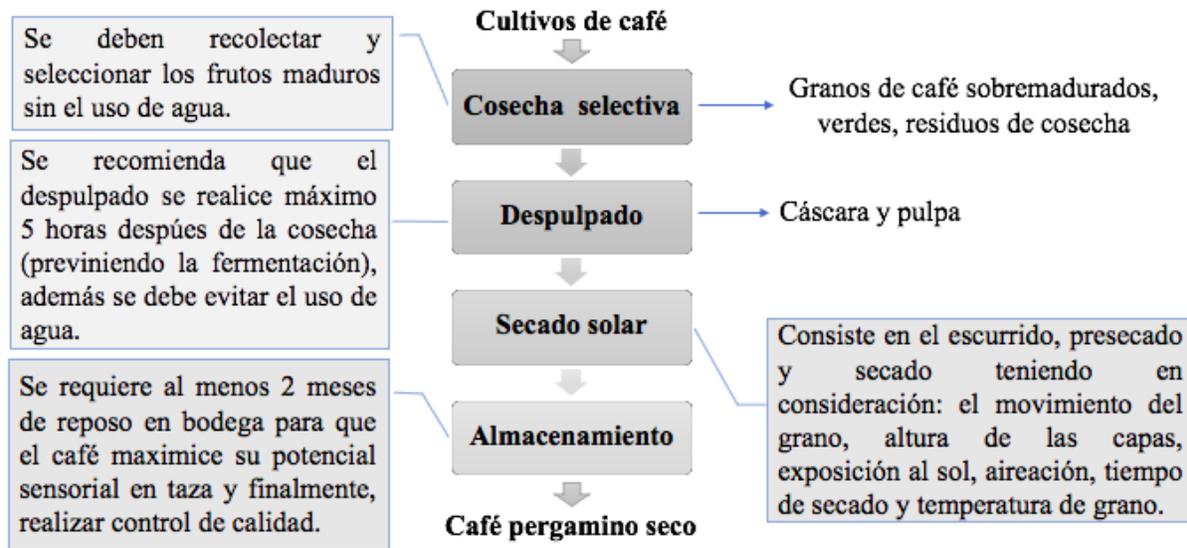
- ✓ El café Honey destaca los atributos del café y mejora el precio dentro de la oferta y demanda de cafés especiales como lo afirma (Mejia-Lotero et al., 2016) (L. Soto, 2018).
- ✓ El café producido vía Honey no tiene un consumo de agua siempre y cuando la selección se realice en zarandas, manualmente o con métodos de selección y despulpado en seco.
- ✓ El café Honey destaca por su dulzor, taza limpia suave con notas y perfil sensorial que depende de la región de cultivo y su variedad (Gonzales Díaz et al., 2019).
- ✓ Este proceso es una alternativa sustentable para el pequeño y mediano productor, dando un valor agregado al café la cual mejora la economía de la familia cafetera (Boyacá Vásquez, 2018).
- ✓ El café Honey tiene la desventaja que puede presentar mayor frecuencia de daños físicos y por ende una fermentación incontrolada de la almendra (Ayala Ceballos, 2020).

*Nota.* Descripción, tipos, procesamiento y ventajas del café Honey.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, durante este proyecto se consideró como una alternativa viable y sustentable para el beneficio convencional de café, el procesamiento en vía semiseca (Honey), el cual presenta una alta reducción de la huella hídrica, que depende de la cantidad retirada de mucilago y la forma de su retiro. Sin embargo, durante este proyecto se propone la producción de café Black Honey, ya que se estima una reducción superior al 90%, pues el secado se realiza con todo el mucílago, dando valor agregado a uno de los residuos más contaminantes y mejorando la calidad del café pergamino seco. Esta propuesta sustentable del beneficio de café Honey, se expone en la figura 3.

**Figura 3**

*Alternativa 2 de procesamiento de café*



*Nota.* Esquemización del proceso de beneficio Honey y principales recomendaciones. Ajustado de (Gonzales Díaz et al., 2019) (Boyacá Vásquez, 2018).

Cabe resaltar que para la cosecha selectiva se recomienda realizar de forma manual empleando un refractómetro y zaranda para clasificar los frutos aptos (maduros con grados Brix entre 18 y 24%, (Ayala Ceballos, 2020)). De igual manera, para realizar el despulpado, conviene usar una despulpadora convencional sin agua y en cuanto al secado solar, lo más recomendado es realizar en paseras solares (camas africanas) y para fincas de mayor producción que requieran agilizar el secado e incluso aquellas donde las condiciones climáticas sean muy variables, es recomendable explorar con los modelos híbridos (secador solar con inyección de aire caliente) expuestos en capítulos anteriores. Finalmente, puesto que la pulpa es el único residuo generado, se recomienda emplear en vermicompostaje (lombricultura) para dar valor agregado a este subproducto.

En este sentido, se resalta la disminución de la huella hídrica mediante dos alternativas, la primera de ellas (tratamiento de aguas), se enfatiza en la reducción del DBO, principal contaminante de las fuentes hídricas, por medio de tratamientos físicos y biológicos de bajo costo, además del aprovechamiento de los subproductos generados. En cuanto a la segunda alternativa

(beneficio Honey), evita la contaminación a los recursos hídricos dándole valor agregado al mucílago que a su vez incrementa la calidad del café.

Desde una perspectiva más general, estas dos alternativas permiten acceder a certificaciones de Rainforest Alliance y UTZ, las cuales centradas en la producción sostenible, son las más importantes en la agroindustria del café. Siendo la de RainForest Alliance (RFA) enfocada a la protección del medio ambiente, además de incluir criterios sociales y económicos, a diferencia de la UTZ que se centra en la gestión patrimonial, combinando conceptos de responsabilidad social y buenas prácticas de gestión y producción. En este sentido, los caficultores certificados agregan valor a su producto y reducen su exposición a la volatilidad de los precios, pues ocupan un espacio en el mercado que garantiza un diferencial de precio con relación al café no certificado (Rueda et al., 2013)(Leme et al., 2019).

## 5 Conclusiones

El proceso convencional del beneficio húmedo de café, implica altas cantidades de agua limpia y generalmente potable, desencadenando una alta huella hídrica, pues su disposición final no es controlada y ocasiona la contaminación de los recursos hídricos y suelos por los vertimientos irresponsables.

Además, el uso desmesurado de este recurso pone en riesgo la calidad de vida de los habitantes cercanos, ya que puede generar un agotamiento de este u ocasionar su contaminación, causando enfermedades, plagas, afectaciones al ambiente u otros, a largo plazo.

En cuanto a los avances tecnológicos se encontró que la tecnología BECOLSUB desarrollada por Cenicafé, reduce drásticamente la contaminación y huella hídrica generada en el beneficio húmedo tradicional del café. Sin embargo, se encontró que esta tecnología ha sido poco

aplicada debido a su alto costo de implementación, alta producción requerida y el desconocimiento sobre este.

Asimismo, la tecnología ECOMILL que reduce aún más el consumo de agua, manteniendo la fermentación natural del mucílago para su posterior retiro, requiere de un elevado costo para su implementación, pero maneja adecuadamente los residuos con menor capacidad de operación. Cabe resaltar que estas tecnologías exigen mayor socialización ante los pequeños y medianos caficultores.

Se propone como primera alternativa, la disposición de residuos, la cual es de fácil acceso e implementación para los pequeños y medianos caficultores y se basa en el tratamiento de aguas miel mediante un sedimentador, un lecho filtrante y finalmente, un tratamiento biológico; recalcando la importancia de reducir el impacto ambiental generado y es una alternativa pensada en el modelo de economía circular para que futuros estudios analicen experimentalmente su implementación.

Como una alternativa externa al beneficio húmedo, se encuentra el beneficio Honey, el cual es sustentable para el pequeño productor, reduce en gran magnitud el consumo de agua e impacto ambiental ocasionado por la huella hídrica. Adicionalmente, disminuye los subproductos generados, facilitando su tratamiento e incluso dando valor agregado para obtener un café pergamino seco con una taza diferenciada y calidad destacada, ocasionando una mayor valoración económica del producto; siendo un proceso más simple, que reduce la mano de obra requerida, maquinaria o infraestructura, sin embargo se enfatiza en el estudio de costos asociados a este proceso.

Durante el beneficio Honey, el mucílago se seca sobre el grano hasta una humedad de 10-12%, siendo representativo un café de sabor distintivo y carácter especial como resultado de la

influencia del mucílago. Asimismo, su apariencia depende de la cantidad de mucílago con la que se secó el grano y el grado de exposición al sol. Por lo cual, son variables a manipular durante el proceso, al igual que la prevención de la fermentación, el tiempo, tipo y condiciones de secado y su disposición final, esto con la finalidad de conservar la calidad del café Honey.

Cabe resaltar que el beneficio Honey requiere de personal calificado para su implementación adecuada, de lo contrario, se podría afectar la calidad del café como resultado de la fermentación descontrolada del mucílago y adicionalmente también se mitiga la complejidad de implementación, ya que como tradicionalmente ha sido empleado el beneficio convencional (vía húmeda), este nuevo procesamiento en la economía cafetera Colombiana genera desconfianza a los caficultores más conservadores.

## **6 Recomendaciones**

Se recomienda realizar el estudio experimental del sistema de tratamiento de aguas miel planteado durante el presente proyecto, con la finalidad de conocer la efectividad del sistema y si es posible su implementación para recircular el agua tratada al lavado, limitando el consumo de agua en modelo lineal y pasando a un modelo circular, en donde no se afecte la calidad del producto. Además, se enfatiza en el estudio de costos de este sistema.

Se sugiere estudiar la unión de residuos de los caficultores de la zona con la finalidad de realizar un solo tratamiento con cantidades considerables e implementar la primera alternativa de este proyecto, con el objetivo de reducir costos, impacto ambiental y huella hídrica.

Se invita a los organismos gubernamentales y a las organizaciones privadas apoyar al pequeño y mediano caficultor con sistemas de capacitaciones y aportes técnicos que permitan fortalecer el proceso de beneficio de café y reducir la huella hídrica.

Se sugiere, ampliar el estudio exploratorio, incrementando la investigación sobre maquinaria apropiada, parámetros de cosecha, costos, etapas y condiciones en el beneficio Honey, así como la exposición de estos estudios a los pequeños y medianos caficultores para consolidar la producción de café Honey.

Es necesario enfatizar la producción de café colombiano y sus investigaciones en procesos sostenibles que mejoren la calidad del producto, con métodos amigables para el medio ambiente. Logrando así, ampliar la oferta exportable de cafés especiales y certificados.

En cuanto a la implementación del beneficio Honey, se resalta la importancia de que lo realice personal calificado, que esté capacitado y conozca el método, con el propósito de que se cumplan a cabalidad las condiciones del proceso. Además, se aconseja constante actualización y un programa con personal experto en catación que periódicamente realice análisis físicos y organolépticos al producto, verificando la calidad y correcto funcionamiento del proceso. Sugiriendo que las federaciones y asociaciones cafeteras junto a entidades gubernamentales fortalezcan, apoyen y patrocinen la implementación de este método.

### Referencias Bibliográficas

- Acarley, F., & Quipuzco, L. (2020). Producción de metano mediante digestión anaerobia de aguamiel, subproducto del beneficio húmedo del café. *Agroindustrial Science*, 10(1), 7–16. doi: 10.17268/agroind.sci.2020.01.01
- Agámez Hernandez, J. (2017). Determinación de la viabilidad técnica para la automatización de un biorreactor usado para la fermentación de café de la empresa Penagos Hermanos. In Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander.
- Alvarez Martinez, C. J., & Balaguera Santos, J. A. (2015). Propuesta de alternativas para mitigar la contaminación hídrica por el beneficio del café. In Programa especialización en ingeniería ambiental. Universidad Industrial de Santander.
- Arango Restrepo, M. (1999). El beneficio ecológico del café en Colombia. *Cuaderno de Desarrollo Rural*, 42, 117–143.
- Arenas Estevez, M. F. (2016). *Aplicación del reactivo de Fenton en el tratamiento de aguas residuales del desmucilaginado mecánico de café en la hacienda Majavita municipio de Socorro Santander*. Universidad Industrial de Santander.
- Arévalo Uribe, D. (2012). Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica. In WWF COLOMBIA. Cali. Retrieved from [wwf.org.co](http://wwf.org.co)
- Arévalo Uribe, D., Lozano Arango, J. G., & Sabogal Mogollón, J. (2011). Estudio nacional de huella hídrica Colombia Sector Agrícola. In Sostenibilidad Tecnología y Humanismo. Cali.
- Arreguín Cortés, F., López Pérez, M., Marengo Mogollón, H., & Tejeda González, C. (2007). Agua virtual en México. *Ingeniería Hidráulica En México*, 22(4), 121–132.
- Ayala Ceballos, D. C. (2020). *Evaluación de las propiedades sensoriales del café variedad castillo, caturra y Colombia (coffea arábica l.) durante el proceso de secado Honey, a diferentes alturas sobre el nivel del mar en fincas cafeteras de la zona norte del departamento de Nariño*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.
- Barrios Orozco, M. A. (2018). Buenas prácticas de beneficiado húmedo del café, fundamentales para mantener la calidad. In Boletín Técnico CEDICAFÉ.
- Borém, F. M., Coradi, P. C., Saath, R., & Oliveira, J. A. (2008). Qualidade do café natural e despulpado após secagem em terreiro e com altas temperaturas. *Ciência e Agrotecnologia*, 32(5), 1609–1615. doi: 10.1590/s1413-70542008000500038

- Boyacá Vásquez, L. A. (2018). *Estudio exploratorio de la obtención de café verde mediante beneficio Honey y la determinación de su calidad en taza*. Universidad Nacional de Colombia.
- Briceño-Martínez, B., Castillo-Calderón, J., Carrión-Jaura, R., & Díaz-Sinche, D. (2020). Propuesta de implantación de invernadero de secado de café con cubierta parabólica y estructura modular adaptada. *Ingenius*, 24(2), 36–46. doi: 10.17163/ings.n24.2020.04
- Camacho Fonseca, S., & Ramirez Hernandez, O. (2015). Diseño de un secador para café mediante el calentamientos del aire en dos etapas utilizando energía solar. In Universidad de Costa Rica. Universidad de Costa Rica.
- Campos Morales, L. F., & Durán Medina, D. A. (2019). Diseño de un sistema de tratamiento para las aguas residuales agrícolas generadas en el Beneficio Húmedo del Café en la finca Buena Vista; Planadas Tolima, 2019 [Universidad El Bosque]. In Universidad El Bosque. Retrieved from [https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2567/Campos\\_Morales\\_Luisa\\_Fernanda\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2567/Campos_Morales_Luisa_Fernanda_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Clavijo, S. (2019, October 12). Panorama cafetero 2019-2020. *La República*. Retrieved from <https://www.larepublica.co/analisis/sergio-clavijo-500041/panorama-cafetero-2019-2020-2920631>
- Curo, E. C. (2013). Asistencia técnica dirigida en la cosecha y postcosecha en el cultivo de café. In Agrobanco. Perú.
- D'Areny, À. (n.d.). Clasificación y calificación del café. In Sabor de Café de Albert Solà. Zaragoza.
- Do Carmo, K. B., Do Carmo, J. C. B., Krause, M. R., & Peterle, G. (2020). Sensory and physiological quality of arabic coffee under different fermentation times. *Bioscience Journal*, 36(2), 429–438. doi: 10.14393/BJ-v36n2a2020-43255
- Fajardo, E. G. (2019). *Cartilla Produccion De Cafes Especiales.Pdf* (p. 26). Grupo Alcanno.
- Fernández Cortés, Y., Sotto Rodríguez, K. D., & Vargas Marín, L. A. (2020). Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. *Produccion + Limpia*, 15(1), 93–110. doi: 10.22507/PML.V15N1A7
- Gallo, L., Porres, C., & Franco, M. (2000). Guía de Prevención de la Contaminación para el Beneficiado del Café en el Salvador. In USAID/Environmental Pollution Prevention Project

(EP3). Arlington.

- Garay Román, J., & Rivero Méndez, J. (2014). Biosistema para purificar aguas residuales del beneficio húmedo de café, distrito La Coipa, departamento de Cajamarca, 2014. *Manglar*, 11(1), 43–50.
- Garzón Martínez, R. Y. (2020). *Análisis de ciclo de vida del proceso de beneficio ecológico del café (BECOLSUB) en el departamento de Santander*. Universidad Industrial de Santander.
- Gómez, O. (2010). Guía para la innovación de la caficultura - De lo convencional a lo orgánico. In FUNDESYRAM. San Salvador.
- Gonzales Díaz, J. R., Gonzales Vásquez, R. L., Gutiérrez Pérez, F. R., & Rojas Coronado, J. M. (2019). *Desarrollo de la oferta de cafés de especialidad (Honey) con alta valoración en taza para tostadores de Estados Unidos: Plan de Negocios para la empresa Peruvian Harvest Agronegocios SAC en joint venture con la CACFEVAM Ltda en el valle del Alto Mayo (Reg [Universitas ESAN]. Retrieved from [https://repositorio.esan.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12640/1632/2019\\_MAAA\\_17-3\\_02\\_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.esan.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12640/1632/2019_MAAA_17-3_02_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)*
- Gutiérrez Guzmán, N., Valencia Granada, E., & Aragon Calderon, R. A. (2014). Eficiencia de remoción de DBO5 y SS en sedimentador y lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café (*Coffea arabica*). *Colombia Forestal*, 17(2), 151. doi: 10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a02
- Leme, P. H. M. V., & Pinto, C. L. (2019). Qualidade e sustentabilidade: sistemas de certificação do café sob a ótica dos Pilares da Qualidade. *Revista Agrogeoambiental*, 10(4), 9–25. doi: 10.18406/2316-1817v10n420181159
- Mantilla Duarte, J. (2019). Optimización del proceso conocido como “Beneficio Húmedo y Seco” en la industria de café. Caso: finca “Villa Ilma Maria” en el municipio de toledo, Norte de Santander. In Fundación Universidad De América.
- Mejia-Lotero, F. M., Acero-Reyes, N. L., Duque-Buitrago, L. F., & Serna-Jiménez, J. A. (2016). Semihumid coffee fermentation to obtain especial honeyed coffee. *Vitae*, 23, S656–S660.
- Morales Rojas, E., Oliva Cruz, S. M., Rascón Barrios, J., Milla Pino, M. E., Villegas Rivas, D. A., & Chavez Quintana, S. G. (2020). Sistemas de tratamiento de aguas mieles de café en la Provincia de Rodríguez de Mendoza, Perú. *Revista Colombiana De Investigaciones Agroindustriales*, 7(1), 84–90. doi: 10.23850/24220582.2918

- Oliveros-Tascón, C. E., Sanz-Uribe, J. R., Montoya-Restrepo, E. C., & Ramírez-Gómez, C. A. (2011). Equipo para el lavado ecológico del café con mucílago degradado con fermentación natural. *Revista de Ingeniería*, 33, 61–67. doi: 10.16924/revinge.33.7
- Oliveros Tascón, C., Pabón Usaquén, J., Montoya Restrepo, E., Ramírez Gómez, C., & Sanz Uribe, J. (2010). Separación de frutos de café verdes por medios mecánicos. *Cenicafé*, 61(3), 262–271. Retrieved from <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061%2803%29262-271.pdf>
- Oliveros Tascón, C., Rodríguez Valencia, N., Ramírez Gómez, C., & Sanz Uribe, J. (2015). Beneficio de Café en Colombia. *Avances Técnicos Cenicafé*, 37. Retrieved from [https://www.cenicafe.org/es/publications/Final\\_libro\\_Beneficio\\_isbn.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/Final_libro_Beneficio_isbn.pdf)
- Oliveros Tascón, C., Sanz Uribe, J., Ramírez Gómez, C., & Mejía González, C. (2007). *Separador Hidráulico De Tolva Y Tornillo Sinfín. I.*
- Oliveros Tascón, Carlos E, Ramírez Gómez, C. A., Tibaduiza Vianchá, C. A., & Sanz Uribe, J. R. (2017). Construcción de secadores solares tipo túnel con nuevos materiales. In *Cenicafé - Centro Nacional de Investigaciones de Café, Avances Técnicos (Vol. 482, Issue 4). Manizales.*
- Oliveros Tascón, Carlos Eugenio, Sanz Uribe, J. R., & Ramírez Gómez, C. A. (2018). Tanque de fermentación fabricado en plástico. In *Avances Técnicos Cenicafé (Vol. 496). Manizales.* Retrieved from [www.cenicafe.org](http://www.cenicafe.org)
- Orrego, D., Zapata-Zapata, A. D., & Kim, D. (2018). Optimization and scale-up of coffee mucilage fermentation for ethanol production. *Energies*, 11(4), 1–12. doi: 10.3390/en11040786
- Prada, Á., Vela, C. P., Bardález, G., & Saavedra, J. (2019). Effectiveness of a coffee drying process using solar dryers with a continuous air flow system powered by photovoltaic energy, in the San Martín region, Peru. *Informacion Tecnologica*, 30(6), 85–92. doi: 10.4067/S0718-07642019000600085
- Quintanar Olguin, J., & Roa Durán, R. (2017). Evaluación térmica y financiera del proceso de secado de grano de café en un secador solar activo tipo invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(2), 321–331. doi: 10.29312/remexca.v8i2.53
- Quintero Díaz, S. L. (2016). *Estabilización de la biomasa residual de la pulpa de café mediante procesos bioquímicos: Vermicompostaje y Digestión Anaerobia*. Universidad Industrial de Santander.

- Raffo Lecca, E., & Ruiz Lizama, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 17(1), 71–80.
- Ramos Giraldo, P. J., Sanz Uribe, J. R., & Oliveros Tascón, C. E. (2010). Identificación y clasificación de frutos de café en tiempo real, a través de la medición de color. *Cenicafé*, 61(4), 315–326.
- Robledo Giraldo, N. (2020). *Tecnologías utilizadas en el beneficio del café para la reducción de la contaminación ambiental y los procesos de adopción*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Romero, M., Quintero, M., & Monserrate, F. (2016). *Elementos técnicos para la medición de huella hídrica en sistemas agrícolas*. Cali.
- Rueda, X., & Lambin, E. F. (2013). Responding to Globalization: Impacts of Certification on Colombian Small-Scale Coffee Growers. *Ecology and Society*, 18(3), 21. doi: <http://dx.doi.org/10.5751/ES-05595-180321>
- Sandoval Niño, Z. L., & Prieto Ortiz, F. A. (2007). Caracterización de café cereza empleando técnicas de visión artificial. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 60(2), 4105–4127. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/1799/179914078015.pdf>
- Sandoval Salazar, I. A., Darwich Cedeño, M. T., Castañeda, M. D. R., Torres Munar, W. A., & Montenegro Ruiz, L. C. (2021). Aproximación al tratamiento de aguas residuales del lavado del café con las microalgas *Parachlorella kessreli* y *Desmodesmus armatus*. *Revista Mutis*, 11(2), 32–43. doi: 10.21789/22561498.1755
- Sandoval, Z., & Prieto, F. (2009). Procesamiento de imágenes para la clasificación de café cereza. *Prospectiva*, 7(1), 67–73.
- Santos, O. L., Reinato, C. H. R., Junqueira, J. D., Franco, E. L., Souza, C. W. A., & Rezende, A. N. (2018). Custo-benefício da secagem de café em diferentes tipos de terreiro. *Revista Agrogeoambiental*, 9(4), 11–21. doi: 10.18406/2316-1817v9n42017966
- Sarasty Zambrano, D. J. (2012). *Alternativas de tratamiento del mucilago residual producto del beneficiadero del café*. Universidad Industrial de Santander.
- Solano Valencia, J. I. (2014). *Implementación de infraestructura para el beneficio húmedo y seco del café a pequeños caficultores de la veredas las Yescas, municipio de Sotará, departamento del Cauca*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD.
- Soto, C. (2010). *Guía técnica para el beneficiado de café protegido bajo una indicación geográfica*

- o denominación de origen* (G. C. Nelson Omar Fúnez & A. García (eds.)). Guatemala.
- Soto, L. (2018). Guía de buenas prácticas para la producción de café semi lavado - Honey y natural. *Asociación de Mujeres En Café Guatemala*.
- Suherman, S., Widuri, H., Patricia, S., Susanto, E. E., & Sutrisna, R. J. (2020). Energy analysis of a hybrid solar dryer for drying coffee beans. *International Journal of Renewable Energy Development*, 9(1), 131–139. doi: 10.14710/ijred.9.1.131-139
- Torres-Valenzuela, L. S., Sanín-Villarrea, A., Arango-Ramírez, A., & Serna-Jiménez, J. A. (2019). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café. *Revista ION*, 32(2), 59–66. doi: 10.18273/revion.v32n2-2019006
- Torres Ocampo, S. (2013). *Diseño y construcción de tres máquinas para el lavado mecánico del café con fermentación natural utilizando la tecnología DESLIM en el Centro Nacional de Investigaciones de Café CENICAFÉ*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Valencia Carrillo, A. O. (2017). *Método de diseño de un secador de café por convección forzada utilizando simulación dinámica* (Vol. 6). Univerisdad Industrial de Santander.
- Yadav, K. C., Subba, R., Shiwakoti, L. D., Dhungana, P. K., Bajagain, R., Chaudhary, D. K., Pant, B. R., Bajgai, T. R., Lamichhane, J., Timilsina, S., Upadhyaya, J., & Dahal, R. H. (2021). Utilizing coffee pulp and mucilage for producing alcohol-based beverage. *Fermentation*, 7(2), 1–13. doi: 10.3390/fermentation7020053

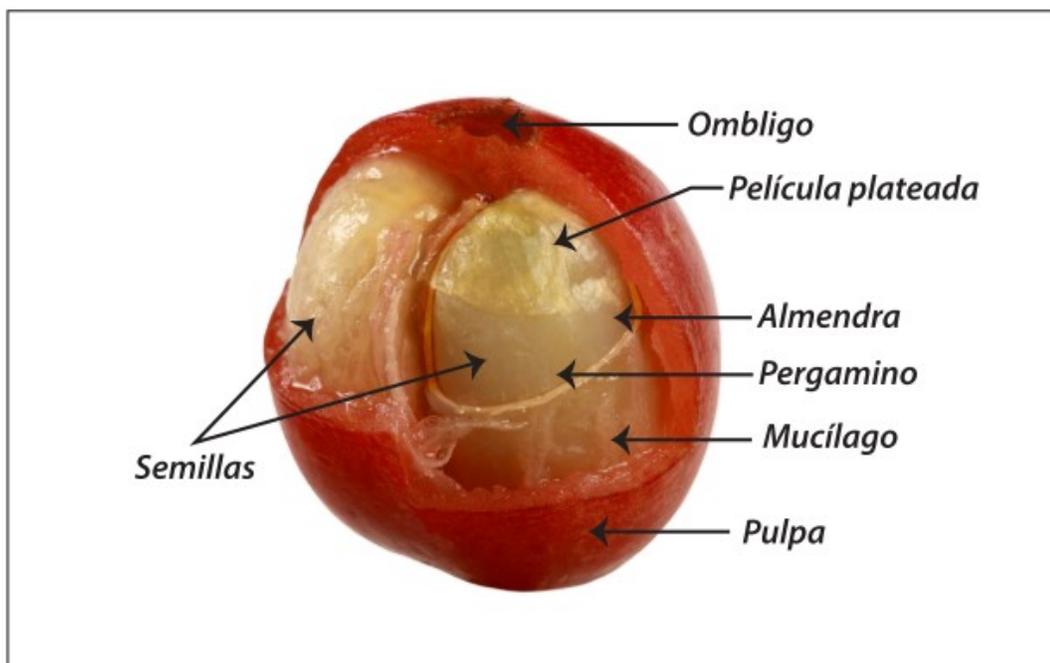
**Apéndices**

**Apéndice A.** Distribución porcentual de la huella hídrica en los productos agrícolas

Producto	HH Verde (Mm <sup>3</sup> /año)	% total	Producto	HH Gris (Mm <sup>3</sup> /año)	Total %
<b>Café</b>	7458	12%	Café	1151	54,9%
<b>Plátano</b>	4377	11%	Arroz	400	19,1%
<b>Maíz</b>	4359	13%	Maíz	237	11,3%
<b>Caña de azúcar</b>	4181	11%	Papa	151	7,2%
<b>Arroz</b>	3212	12%	Cacao	45	2,2%
<b>Palma africana</b>	2803	8%	Palma Africana	33	1,6%
<b>Cacao</b>	1207	4%	Caña de azúcar	20	0,9%
<b>Papa</b>	1090	3%	Tomate	16	0,8%
<b>Banano</b>	822	2%	Zanahoria	9	0,4%

*Nota.* La tabla representa el consumo y la distribución porcentual de los principales productos que intervienen en la huella hídrica en Mm<sup>3</sup> = millones de metros cúbicos. Adaptado de: (Arévalo Uribe, 2012).

**Apéndice B.** Composición de la cereza de café



*Nota.* Partes del fruto de café. Tomado de (Ramos Giraldo et al., 2010)

**Apéndice C.** Ecuaciones de búsqueda empleadas en Scopus

Ecuación empleada	Resultados netos	Incluidos por título
("Beneficio húmedo") AND ("café")	6	6
("Honey") AND ("café")	5	4
("lavado" OR "desmucilaginado") AND ("café")	24	0
("clasificación") AND ("café")	94	0
("despulpado") AND ("café")	7	0
("huella hídrica") AND ("café")	6	1
("certificación") AND ("café")	3	2
("transporte") AND ("café")	119	2
("fermentación") AND ("café")	7	6
("secado") AND ("café")	82	10
("calidad") AND ("procesamiento café")	0	0
("tratamiento de agua") AND ("café")	9	0
("tratamiento del mucilago") AND ("café")	1	0
("secado solar") AND ("café")	8	0
("sistemas de beneficio") AND ("café")	0	0
("selección") AND ("café")	2	2

#### Apéndice D. Ecuaciones de búsqueda empleadas en Web of Science

Ecuación empleada	Resultados netos	Incluidos por título
("Wet milling") AND ("coffee").	1	0
("Honey ") AND ("coffee")	17	3
("washing" OR "desmucilaginado") AND ("coffee")	19	3
("sorting") AND ("coffee")	8	1
("pulping") AND ("coffee")	3	2
("water footprint") AND ("coffee")	5	2
("certification") AND ("coffee")	12	5
("transport") AND ("coffee")	10	1
("fermentation") AND ("coffee")	16	4
("drying") AND ("coffee")	56	21
("quality") AND ("coffee processing")	6	2
("water treatment") AND ("coffee")	20	3
("mucilage treatment") AND ("coffee")	24	7
("solar drying") AND ("coffee")	3	1
("processing systems") AND ("coffee")	2	1
("selection") AND ("coffee")	24	2
("technologies") AND ("coffee processing")	2	0

**Apéndice E.** Estudios asociados a la selección de las cerezas de café

<b>Selección de cerezas de café</b>		
<b><i>Título 1:</i></b>	<b><i>Autores:</i></b>	
<b>Identificación y clasificación de frutos de café en tiempo real, a través de la medición de color</b>	Ramos Giraldo, Paula Jimena Sanz Uribe, Juan Rodrigo Oliveros Tascón, Carlos Eugenio	
	<b><i>Año</i></b>	<b><i>Institución</i></b>
	2010	Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé
<b>Descripción</b>		
<p>El color de la epidermis de café varía de verde (551,5 nm) a rojo (616,18 nm), por la aparición de sustancias como la clorofila y las antocianinas, respectivamente; tonalidades que indican el grado de maduración del fruto. Debido a que la calidad final de la bebida depende de la selección de los granos maduros antes del despulpado, el proceso convencional de separación se fundamenta en la diferencia de densidad de los frutos, el cual requiere de un alto consumo hídrico. Evitando esta huella hídrica, esta investigación consistió en desarrollar un sistema de identificación de frutos rojos de café, determinando el estado de madurez de los frutos. Para ello, se empleó la relación entre el color presente en la pulpa, en componentes “hue” (Matiz) y “saturation” (Saturación), y su respectivo estado de madurez y fue implementado en un sistema embebido, conformado por un sensor de color, una fuente de iluminación, un sistema basado en microprocesador y un algoritmo de clasificación de bajo costo computacional. Es decir, el sistema embebido, tiene 2 funciones, la función de calibración, en la cual el dispositivo aprendió los criterios de identificación, y la función de clasificación en la cual el dispositivo identificó el estado de maduración de cada fruto. Cabe resaltar que el sistema analiza los frutos en tiempo real, siendo un método no destructivo y logra identificar los estados de madurez eficazmente (entre 87,6 y 98,17%), con capacidad de analizar 50 frutos/s (Ramos Giraldo et al., 2010)</p>		
<b><i>Título 2:</i></b>	<b><i>Autores:</i></b>	
<b>Caracterización de café cereza empleando técnicas de visión artificial (2007)</b>	Sandoval Niño, Zulma Liliana Prieto Ortiz, Flavio Augusto	
	<b><i>Año</i></b>	<b><i>Institución</i></b>
	2007	Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín

**Descripción**

El sistema de clasificación mediante visión artificial, permite la extracción de características de los granos de café, tales como la forma, el color y la textura del fruto, que son los parámetros principales con los cuales se hace la clasificación manual, sujeta a error humano. La clasificación de productos por medio de visión artificial comprende los siguientes pasos: adquisición de las imágenes, segmentación de los objetos presentes en la imagen (adecuación de las imágenes), extracción de las características de los objetos, interpretación de estas características y la subsiguiente asignación de los objetos a una clase. En este trabajo se presentó un estudio para la selección de las características más discriminantes en el proceso de clasificación de frutos de café según su estado de madurez. El sistema de selección de características se diseñó empleando el índice de Fisher y el método de análisis multivariado y el conjunto de características seleccionado se evalúa con dos clasificadores: el bayesiano y uno basado en Redes Neuronales Artificiales. Las características seleccionadas corresponden a 4 características de textura, 3 de color y 2 de forma. Durante el proyecto, se seleccionó un lote compuesto por aproximadamente 7500 plantas, a las cuales, durante 8 semanas se recolectaron muestras, cada semana se contó con 100 frutos por muestra y por cada muestra se tomaron 300 imágenes. El sistema de adquisición de imágenes constó de una cámara de video a color (3 CCD), una tarjeta digitalizadora, un computador y dos lámparas de luz blanca. Cabe resaltar que para las características de color se buscó el rojo intenso homogéneo de un fruto maduro, para las características de textura, se esperaba obtener descripciones de la suavidad, rugosidad y regularidad de una región y para las características de forma, se buscó la forma esférica de los frutos maduros. La información de la prueba se dispone en una matriz de confusión, herramienta utilizada para la presentación y el análisis del resultado de una clasificación. Se concluye que características como la textura y la forma de un fruto de café aportan poca información en la clasificación manual pero proporcionan medidas discriminantes en aplicaciones computacionales donde se pueden obtener valores exactos. Se obtuvo el menor error con el clasificador bayesiano, aproximadamente del 5%, pero requirió el mayor tiempo de clasificación, cerca de 5,5 ms. Con el clasificador usando redes neuronales aumentó el error de clasificación, aproximadamente al 7%, pero disminuyó el tiempo de clasificación a 0,8 ms (Sandoval Niño et al., 2007).

**Apéndice F.** Estudio asociado a la fermentación de café

<b>Fermentación de las cerezas de café</b>		
<b><i>Título 1:</i></b>	<b><i>Autor:</i></b>	
<b>Determinación de la viabilidad técnica para la automatización de un biorreactor usado para la fermentación de café de la empresa Penagos Hermanos</b>	Agámez Hernández, Jennifer	
	<b><i>Año</i></b>	<b><i>Institución</i></b>
	2017	Universidad Industrial de Santander
<b>Descripción</b>		
<p>Durante el desarrollo de la fermentación se genera calor como resultado del metabolismo de las células, por lo cual se requiere de un control de la temperatura evitando la producción de ácidos que ocasionan sabores indeseables en la bebida. Ahora bien, este estudio recalca la importancia de remover el exceso de calor mediante sistemas de alimentación de agua fría, por lo cual se denomina proyecto Fermentación Controlada y consiste en una solución tecnológica para el pequeño y mediano caficultor mediante la implementación de un biorreactor automatizado para la fermentación de café. El fermentador (recipiente que provee las condiciones adecuadas a una cepa microbiana para que pueda generar eficientemente un determinado metabolito), es de operación discontinua (por lotes) y se le suministra café despulpado sin lavar, el cual se retira al concluir el tiempo de fermentación. El diseño del biorreactor consiste en la suma de un cono truncado más un cilindro, siendo todo de acero inoxidable. Internamente, el fermentador cuenta con ductos para pasar agua de enfriamiento, que están conectados por la chaqueta de enfriamiento y a los ductos de la parte superior, se le ubicaron sensores de temperatura (termocupla). Como resultados, el prototipo mostró que la disposición de los sensores de temperatura no es la adecuada, pues el cableado y cabezote entran en contacto con el café y genera errores en las lecturas de temperatura. En este sentido, se resalta la importancia de mejorar el prototipo y además, analizar más a fondo los costos de implementación de este tipo de biorreactor (Agámez Hernandez, 2017).</p>		

**Apéndice G.** Estudios asociados al secado solar en patios

<b>Secado solar en patios</b>		
<b><i>Título 1:</i></b>	<b><i>Autores:</i></b>	
<b>Qualidade do café natural submetido a diferentes períodos de repouso durante a secagem (Calidad del café natural y lavado después del secado en tierra y a alta temperatura.)</b>	Meira Borém, Flávio Carteri Coradi, Paulo	
	<b><i>Año</i></b>	<b><i>Institución</i></b>
	2012	Ciencia e agrotecnología
<b>Descripción</b>		
<p>El objetivo del presente trabajo fue comprobar la calidad del café natural en el proceso de secado en terrazas y secado con aire caliente a 40° y 60°C. El trabajo se llevó a cabo en el Departamento de Ingeniería y en el Polo Tecnológico de Postcosecha de la Universidad Federal de Lavras. La cosecha de café, del cultivar Topazio, fue selectiva. Durante el secado, el contenido de agua de los granos se reduce de 60% a 11,5% de humedad. Para evaluar la calidad, se realizaron pruebas de conductividad eléctrica y de lixiviación de potasio; determinación de la acidez total titulable; prueba de acidez grasa; azúcares totales y reductores. Los resultados indicaron que el tiempo de secado se ve afectado por diversos factores como tipos de secado y procesamiento; la conductividad eléctrica, la lixiviación de potasio, la acidez titulable total y la acidez grasa aumentan con el incremento de la temperatura de secado, además de que el secado a 60°C afecta negativamente la calidad del café (Borém et al., 2008)</p>		
<b><i>Título 2:</i></b>	<b><i>Autor:</i></b>	
<b>Custo-benefício da secagem de café em diferentes tipos de terreno (Rentabilidad del secado de café en diferentes tipos de terrazas.)</b>	Lahmann Santos, Oswaldo Rodrigues Reinato, Carlos Henrique	
	<b><i>Año</i></b>	<b><i>Institución</i></b>
	2018	Revista Agrogeoambiental
<b>Descripción</b>		
<p>El objetivo de este estudio fue comparar el costo de construcción entre el patio de cemento, lodo asfáltico, cama suspendida, tierra, así como la interferencia de estos patios en la calidad sensorial y los cambios fisicoquímicos del café. El diseño experimental consistió en un diseño completamente aleatorio (DIC), con los tratamientos dispuestos en un diseño factorial. Se utilizaron tres réplicas para cada tratamiento. Posteriormente se realizó una evaluación de la</p>		

composición química y física, además, del análisis de conductividad eléctrica y el análisis sensorial. Los resultados indicaron que el patio de lodo de cemento es una excelente opción desde un punto de vista económico y mejora la calidad del café, en comparación con el patio de tierra (Santos et al., 2018).

**Apéndice H.** Estudios asociados al secado solar parabólico y túneles solares

<b>Secador solar parabólico y túneles solares</b>		
<b>Título 1:</b>	<b>Autores:</b>	
<b>Energy analysis of a hybrid solar dryer for drying coffee beans (Análisis energético de un secador solar híbrido para secar café Frijoles)</b>	Suherman, Suherman	
	Widuri, Hasri	
	Patricia, Shelyn	
	Susanto, Evan Eduard	
	Sutrisna, Raafi Jaya	
	<b>Año</b>	<b>Institución</b>
	2020	International Journal of Renewable Energy Development
<b>Descripción</b>		
<p>Se realizó un secado solar híbrido de granos de café y se llevó a cabo un análisis energético, con la luz solar como energía principal del proceso apoyado por medio de calentamiento adicional, para evaluar el rendimiento del sistema, en términos de eficiencia energética, en comparación con el secado solar y el método de secado al aire libre. El secador está equipado con tres compartimentos: colector solar, cámara de secado y un quemador de gas que actuó como calentador auxiliar. El contenido de humedad inicial de los granos de café era del 54,23% p.b. y se redujo hasta el contenido de humedad final entre el 11-12% p.b. Los granos de café se secaron más rápidamente cuando se sometieron al método de secado híbrido solar,. Los resultados indicaron que el tiempo de secado de los granos de café varió de 14 a 16 horas para a la temperatura de 40°C y 60°C, Se con concluyo: todos los granos de café se secaron hasta un contenido de humedad final de 11% y una temperatura de secado más alta conducirá a una reducción de la humedad más rápida, la cual puede variar según la condición geográfica y el factor de ubicación. La modelización matemática muestra que el modelo Page es el más</p>		

<p>adecuado para describir el comportamiento de secado de los granos de café utilizando un secador solar híbrido (Suherman et al., 2020).</p>		
<b>Título 2:</b>		<b>Autores:</b>
<p><b>Evaluación térmica y financiera del proceso de secado de grano de café en un secador solar activo tipo invernadero</b></p>	<p>Quintanar Olguin, Juan Roa Durán, Refugio</p>	
	<b>Año</b>	<b>Institución</b>
	2017	Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas
<p><b>Descripción</b></p> <p>El objetivo del presente trabajo fue evaluar la eficiencia térmica y financiera del proceso de secado de grano de café en un secador solar activo tipo invernadero. El estudio se realizó durante el año 2014. En 44 h de sol (5 días), se obtuvo un porcentaje de humedad del café pergamino de 11%. , se encontró que el tiempo de secado es de 5 días, reduce en un 40- 50% aproximadamente con respecto al secado en terraza, con un incremento de la temperatura interior de 20 °C respecto a la temperatura ambiente, que genera una eficiencia global del secador solar estimada en aproximadamente 12%. y la recuperación de la inversión se logra en solo 3 meses por lo que representa una alta viabilidad para los caficultores (Quintanar Olguin et al., 2017).</p>		
<b>Título 3:</b>		<b>Autores:</b>
<p><b>Effectiveness of a coffee drying process using solar dryers with a continuous air flow system powered by photovoltaic energy, in the San Martín region, Peru (Efectividad de un Proceso de Secado de Café usando Secadores Solares con Sistema de Flujo de Aire Continuo Impulsado por Energía Fotovoltaica, en la Región San Martín, Perú)</b></p>	<p>Álvaro Prada, Cynthia P. Vela, Gabriela Bardález.</p>	
	<b>Año</b>	<b>Institución</b>
	2019	Información Tecnológica
<p><b>Descripción</b></p> <p>El objetivo de esta investigación fue reducir el tiempo de secado de café hasta obtener un promedio de 12% de humedad, mediante el uso de módulos secadores solares implementados con un sistema de flujo de aire continuo impulsado por energía fotovoltaica, lográndose mayor</p>		

calidad del grano seco del café y con menores defectos físicos, además de una mejor calidad sensorial. La investigación fue de tipo experimental de esquema factorial. Teniendo como resultado un tiempo de secado los granos de café son de 5 días en promedio, lo que demuestra que el tiempo de secado bajo estas condiciones se reduce la humedad hasta 12.29% (Prada et al., 2019).

#### Apéndice I. Estudios asociados al beneficio ecológico

<b>Beneficio ecológico</b>		
<b><i>Título 1:</i></b>	<b><i>Autores:</i></b>	
<b>Propuesta de alternativas para mitigar la contaminación hídrica por el beneficio del café</b>	Alvarez Martinez, Carlos Julio Balaguera Santos, Javier Arturo	
	<b>Año</b>	<b>Institución</b>
	2015	Universidad Industrial de Santander
<b>Descripción</b>		
<p>El objetivo de este estudio fue proponer alternativas para mitigar la contaminación hídrica por el beneficio húmedo del café, en pequeñas y medianas fincas productoras ya que representa una fuente importante de empleo para las familias campesinas pero a su vez genera una un gran impacto ambiental dentro de los procesos de producción y beneficio del café, denotando una problemática de gran afectación ambiental en especial el proceso de eliminación del mucílago y el destino final de las aguas miel que se producen. se realizó una revisión bibliográfica para determinar los estudios y adelantos tecnológicos logrados en el sector para la atención y mitigación de esta problemática, lo cual se comprobó de la tecnologías disponibles pero que no es masiva su implementación; por lo tanto, se analizó las causas de la poca implementación de estas tecnologías y finalmente se propone alternativas de solución para los productores cafeteros (Alvarez Martinez et al., 2015).</p>		

**Apéndice J.** Estudios asociados al tratamiento de aguas mieles

<b>Tratamiento de Aguas Mieles</b>		
<b>Título 1:</b>	<b>Autor:</b>	
<b>Sistemas de tratamiento de aguas mieles de café en la Provincia de Rodríguez de Mendoza, Perú</b>	Morales Rojas, Eli Oliva Cruz, Segundo Manuel Rascón, Jesús	
	<b>Año</b>	<b>Institución</b>
	2020	Revista Colombiana De Investigaciones Agroindustriales
<b>Descripción</b>		
<p>El objetivo del presente trabajo fue evaluar tres filtros de tratamiento de aguas mieles de café. Se comparó un filtro un físico (arena, carbón, piedra de río), un filtro biológico con jacinto acuático (<i>Eichhornia crassipes</i>) y lenteja de agua (<i>Lemna minor L.</i>) y, un sistema con coagulantes naturales con moringa), como tratamientos alternativos, a través del aprovechamiento de plantas para absorber y acumular compuestos orgánicos. Como resultado se encontró que con los filtros biológicos y la incorporación de coagulantes se redujeron significativamente los valores de fosfatos y SDT, por lo que las aguas mieles tratadas con esta tecnología podrían ser empleadas en el riego agrícola (Morales Rojas et al., 2020).</p>		
<b>Título 2:</b>	<b>Autor:</b>	
<b>Aplicación del reactivo de fenton en el tratamiento de aguas residuales del desmucilaginado mecánico de café en la hacienda Majavita municipio de Socorro Santander</b>	Arenas Estévez, María Fabiola	
	<b>Año</b>	<b>Institución</b>
	2020	Universidad Industrial de Santander
<b>Descripción</b>		
<p>En esta investigación, se utilizaron <math>FeSO_4 \cdot 7H_2O</math> y <math>Fe_3O_4</math> nanoestructurado sobre la superficie de fibras de fique, como catalizadores homogéneo y heterogéneo, respectivamente, a condiciones ambientales de temperatura y presión. para disminuir el tiempo de arranque del SMTA., disminuyendo los costos del tratamiento químico y la necesidad de procesos de separación o recuperación de hierro residual al final del proceso de oxidación. Se concluye que procesos de oxidación con el reactivo de Fenton es un tratamiento competente para aguas</p>		

residuales de desmucilaginado del café empleando FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O como catalizador homogéneo (Arenas Estevez, 2016).		
<b>Título 3:</b>		<b>Autor:</b>
<b>Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> y SS en sedimentador y lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café.</b>	Gutiérrez Guzmán, Nelson	
	Valencia Granada, Eduardo	
	Aragón Calderón, Renso Alfredo	
	<b>Año</b>	<b>Institución</b>
	2014	Colombia Forestal
<b>Descripción</b>		
<p>El objetivo del presente trabajo consistió en evaluar la eficiencia expresada en porcentaje de remoción de los parámetros DBO<sub>5</sub> y Sólidos Suspendidos (SS) en un sistema de uso convencional de tratamiento de agua por los cafeteros de la zona del sur del Huila, recreando el proceso de beneficio húmedo a nivel de laboratorio, Como alternativa a los sistemas tradicionales de tratamiento de aguas residuales resultantes del beneficio del café. Los resultados mostraron eficiencias de remoción de sólidos suspendidos superiores al 95% y remoción de DBO<sub>5</sub> cercanas al 20%; para completar la remoción de DBO<sub>5</sub> se recomienda completar con un tratamiento biológico con alguna especie de macrófitas (Gutiérrez Guzmán et al., 2014).</p>		

**Apéndice K.** Estudios asociados a humedales artificiales (sistema biológico)

<b>Humedales artificiales</b>		
<b>Título 1:</b>		<b>Autores:</b>
<b>Biosistema para purificar aguas residuales del beneficio húmedo de café, distrito La Coipa, departamento de Cajamarca, 2014</b>	Garay Román, Juan	
	Rivero Méndez, José	
	<b>Año</b>	<b>Institución</b>
	2014	Universidad Nacional de Tumbes - Perú
<b>Descripción</b>		
<p>Construcción de un biosistema o humedad artificial realizando una poza con estructura en cañas de bambú y cobertura de polietileno, el sistema consiste en representar las aguas mieles y cultivar sobre su superficie la planta “jacinto acuático (<i>Eichhornia crassipes</i>)”, la cual presenta buena adaptabilidad a climas tropicales (hasta 35 °C). Este estudio determinó una remoción de DBO (demanda biológica de oxígeno) del 86,57% y ST (sólidos disueltos) del 98,14% y un</p>		

<p>incremento de pH de 5,1 a 6,6; no obstante, para obtener estos resultados fue necesario un tiempo de retención de al menos 2 meses. El estudio concluyó que para aguas residuales tanto de despulpado como de lavado de café, con alta carga orgánica, el método aeróbico del humedal tiene alta eficiencia como tratamiento de estas aguas, además es de fácil manejo para los caficultores sin requerir altos niveles de capacitación y recomiendan esta técnica para tratamiento secundario o incluso terciario debido a sus ventajas en cuanto a su alto rendimiento de remoción de los contaminantes orgánicos y bajo costo económico (Garay Román et al., 2014).</p>		
<b>Título 2:</b>		<b>Autores:</b>
<b>Diseño de un sistema de tratamiento para las aguas residuales agrícolas generadas en el beneficio húmedo del café en la finca Buena Vista; Planadas Tolima, 2019</b>	Campos Morales, Luisa Fernanda Durán Medina, Dayhana Alejandra	
	<b>Año</b>	<b>Institución</b>
	2019	Universidad El Bosque – Bogotá, Colombia
<p><b>Descripción</b></p> <p>Este proyecto propuso el diseño de un sistema de tratamiento para las aguas mieles generadas en la finca Buena Vista Planadas, Tolima. Este sistema estaba integrado por un Sistema Modular de Tratamiento Anaerobio (SMTA) con capacidad máxima de 1.710kg de café cereza/día, seguido de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (SFS) de 4.644 m<sup>2</sup> como complemento del SMTA. El SMTA contó con una trampa de pulpas, reactores hidrolíticos acidogénicos de flujo ascendente RHAFa, una recámara dosificadora y un reactor metanogénico con organismos metanogénicos presentes en el estiércol vacuno o porcino disueltos en agua en proporción 1:1, adicionalmente, se añadió al prototipo, una excavación en tierra llena con tallos de café, para la disposición de excedentes generados por aguas mieles. En cuanto al SFS, se empleó grava, arena u otro tipo de materiales del suelo y se recomienda según la literatura que el humedal será sembrado con especies de platanilla (<i>Heliconia spp</i>) a una distancia entre plantas de 50 cm. El estudio involucró el análisis del beneficio realizado, las aguas residuales, los costos del prototipo y materiales, e incluye balances de materia y energía, encontrando que el sistema planteado es altamente eficiente en la remoción de los contaminantes presentes en el agua residual del beneficio de café, con valores de remoción del 93% en el SMTA y del 87,64% en el SFS. Individualmente, el SMTA mostró una remoción de la carga orgánica superiores al 80% de la DBO<sub>5</sub>, remoción de coliformes del 99%, remoción de Sólidos Suspendidos mayores al 95%,</p>		

remoción de huevos de Helminto del 63 al 100% y una reducción de DQO mayor al 80% y el humedal artificial se caracterizó por no producir biosólidos ni lodos residuales, además de remover con efectividad el DBO, DQO, SST, metales y algunos compuestos orgánicos y microorganismos patógenos de las aguas residuales, incluso permitió la remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles. Además, evitó problemas relacionados a moscos, pues el agua fluye por debajo del medio poroso. Las autoras concluyeron que la aplicación de humedales artificiales es una alternativa viable, que involucra tecnología simple de operar, infraestructura asequible y mantenimiento económico, permitiendo el fácil acceso a pequeños y medianos caficultores. Además, es un tratamiento que es posible durante todo el año, proporcionando hábitat de vida silvestre y espacio verde (Campos Morales et al., 2019).

#### Apéndice L. Estudios asociados al tratamiento de residuos sólidos

Tratamiento de residuos		
<i>Título 1:</i>	<i>Autor:</i>	
<b>Estabilización de la biomasa residual de la pulpa de café mediante procesos bioquímicos: vermicompostaje y digestión anaerobia.</b>	Quintero Díaz, Sandra Liliana	
	<b>Año</b>	<b>Institución</b>
	2016	Universidad Industrial de Santander – Bucaramanga, Colombia
<b>Descripción</b>		
<p>Se analizó el proceso de vermicompostaje y de digestión anaerobia para estabilización de la materia orgánica presente en la pulpa de café. Para el vermicompostaje se trataron 40 kg de pulpa, precompostada por 30 días en contenedor de madera, a la cual se le adicionaron 600 lombrices tipo Roja californiana (<i>Eisenia foetida</i>), la cual es recomendada debido a su rusticidad, capacidad de apiñamiento y confinación, además tolera amplios rangos de pH, humedad, temperatura y come con mucha voracidad todo tipo de materia orgánica. La evaluación generó como resultado del proceso de vermicompostaje de la pulpa del café con <i>Eisenia foetida</i>, 527,5 g de vermicompost/kg de pulpa, con pérdida de biomasa del 52.75% y un aumento en la cantidad de biomasa del 273%; obteniéndose un abono orgánico con condiciones fisicoquímicas apropiadas que lo hacen apto para su utilización agrícola. El tiempo de estudio fue de 96 días, generando en total 21,1 kg de vermicompostaje y 1.390 lombrices.</p>		

En cuanto al proceso de digestión anaerobia de la pulpa de café, empleando estiércol bovino como inóculo, se obtuvo una producción de metano 279,75 mL CH<sub>4</sub>(STP)/gSV de pulpa de café, con rendimientos de 0,87 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgSV de pulpa de café, con una remoción de materia orgánica representada por la concentración de sólidos volátiles de 58 % y 8 L de efluente. Cabe destacar que la digestión anaerobia se recomienda para grandes y medianos caficultores debido a la necesidad de una infraestructura para el uso energético y el vermicompostaje, para pequeños caficultores ya que no requiere grandes cantidades de materia prima para su implementación. En este sentido, los procesos de digestión anaerobia y vermicompostaje son adecuados para la estabilización de la pulpa de café eliminando con ello un problema ambiental, obteniendo efluentes de valor agregado que pueden ser empleados como fuente de energía e incluso en el mismo cultivo de café. Además, reduce la atracción de vectores que atraen enfermedades para los habitantes de la región y también disminuye el impacto negativo realizado por la utilización de fertilizantes químicos, pesticidas e insecticidas en el suelo (Quintero Díaz, 2016).

**Apéndice M.** Estudios asociados al tratamiento del mucílago

<b>Tratamiento del mucílago</b>		
<b>Título 1:</b>	<b>Autor:</b>	
<b>Optimization and scale-up of coffee mucilage fermentation for ethanol production (Optimización y ampliación de la fermentación de mucílago de café para la producción de etanol)</b>	Orrego, David	
	Zapata-Zapata, Arley David	
	<b>Año</b>	<b>Institución</b>
	2018	Energies
<b>Descripción</b>		
Este estudio se enfoca en la producción de bioetanol a partir del mucílago. El uso del mucílago del café proporcionó azúcares fermentables adecuados, principalmente glucosa con componentes nutritivos adicionales, y se fermentó directamente en etanol utilizando una cepa de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> . Las pruebas se realizaron a escala de laboratorio y las condiciones óptimas resultantes. El rendimiento máximo de etanol se obtuvo a una temperatura baja de 28 °C, pH 4.0, con una densidad celular inicial de 3 g L <sup>-1</sup> , que alcanzó alrededor de 23 g L <sup>-1</sup> de producción de etanol, correspondiente al 86,9% de rendimiento teóricamente alcanzable (Orrego et al., 2018).		

<b>Título 2:</b>	<b>Autor:</b>	
<p align="center"><b>Utilizing coffee pulp and mucilage for producing alcohol-based beverage (Utilización de la pulpa de café y el mucílago para producir una bebida a base de alcohol)</b></p>	<p>Yadav, K. C. Subba, Raju Shiwakoti, Lila Devi Dhungana, Pramesh Kumar Bajagain, Rishikesh Chaudhary, Dhiraj Kumar Pant, Bhoj Raj Bajgai, Tirtha Raj Lamichhane, Janardan Timilsina, Sampada Upadhyaya, Jitendra Dahal, Ram Hari</p>	
	<b>Año</b>	<b>Institución</b>
	2021	Ogueri Nwaiwu
<p align="center"><b>Descripción</b></p> <p>Se utilizaron la pulpa de café, el mucílago y los granos con mucílago para elaborar bebidas alcohólicas. Posteriormente se analizaron las características fisicoquímicas, las estructuras cromáticas y las características sensoriales de las bebidas alcohólicas. El contenido de metanol, el contenido de ésteres, el aldehído, el alcohol, la acidez total, la cafeína estaba dentro de los parámetros requeridos obteniéndose así una bebida alcohólica a partir de la pulpa del café con un resultado de calidad superior. Con este estudio se da la posibilidad a seguir con la investigación para la optimización y mejoramiento del proceso de fermentación de las bebidas alcohólicas fermentadas a partir de la pulpa y el mucílago del café manteniendo una excelente calidad (Yadav et al., 2021).</p>		