



# Aplicación de la bioeconomía circular en el proceso de beneficio de café con cero residuos

Nelson Rodríguez Valencia





# Aplicación de la bioeconomía circular en el proceso de beneficio de café con cero residuos

Nelson Rodríguez Valencia  
Investigador Científico III  
Poscosecha

## Como citar

Rodríguez-Valencia, N. (2023). Aplicación de la bioeconomía circular en el proceso de beneficio de café con cero residuos: Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0032>



## COMITÉ NACIONAL

Ministro de Hacienda y Crédito Público  
*Ricardo Bonilla González*

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural  
*Jhenifer Mojica Flórez*

Ministro de Comercio, Industria y Turismo  
*Germán Umaña Mendoza*

Director del Departamento Nacional de Planeación  
*Jorge Iván González*

Representante del Gobierno en Asuntos Cafeteros  
*Jimena Velasco Chaves*

### Representantes Gremiales

Período 1° enero/2019 - 31 diciembre/2022

*Jorge Alberto Posada Saldarriaga (Antioquia)*

*José Alirio Barreto Buitrago (Boyacá)*

*Eugenio Vélez Uribe (Caldas)*

*Daniilo Reinaldo Vivas Ramos (Cauca)*

*Juan Camilo Villazón Tafur (Cesar-Guajira)*

*Javier Bohórquez Bohórquez (Cundinamarca)*

*Ruber Bustos Ramírez (Huila)*

*Javier Mauricio Tovar Casas (Magdalena)*

*Jesús Armando Benavides Portilla (Nariño)*

*Armando Amaya Álvarez (Norte de Santander)*

*Carlos Alberto Cardona Cardona (Quindío)*

*Luis Miguel Ramírez Colorado (Risaralda)*

*Héctor Santos Galvis (Santander)*

*Carlos Sánchez Serrano (Tolima)*

*Camilo Restrepo Osorio (Valle)*

### Gerente General

*Germán Alberto Bahamón Jaramillo*

### Gerente de Operaciones

*Carlos Arturo Azuero Perdomo*

### Gerente Administrativo y Financiero

*Juan Camilo Becerra Botero*

### Gerente Comercial

*Esteban Ordoñez Simmonds*

### Gerente Técnico

*Gerardo Montenegro Paz*

### Director Investigación Científica y Tecnológica

*Álvaro León Gaitán Bustamante*

## COMITÉ EDITORIAL CENICAFÉ

Pablo Benavides M.  
Ph.D. Ing. Agrónomo. Entomología, Cenicafé

Carmenza Esther Góngora B.  
Ph.D. Microbióloga. Entomología, Cenicafé

José Ricardo Acuña Z.  
Ph.D. Biólogo. Fisiología Vegetal, Cenicafé

Diana María Molina Vinasco  
Ph.D. Bacterióloga. Mejoramiento Genético,  
Cenicafé

Luis Fernando Salazar G.  
Ph.D. Ing. Agrónomo. Suelos, Cenicafé

Secretaría Técnica Comité Editorial, revisión  
de textos y corrección de estilo  
Sandra Milena Marín L.  
Ing. Agrónoma, Esp. M.Sc.

### DISEÑO

Carmenza Bacca R.

### FOTOGRAFÍAS

Archivo Cenicafé

### IMPRESIÓN

ISBN 978-958-8490-65-6

ISBN 978-958-8490-66-3 (En línea)

DOI 10.38141/cenbook-0032

Los trabajos suscritos por el personal técnico del Centro Nacional de Investigaciones de Café son parte de las investigaciones realizadas por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Sin embargo, tanto en este caso como en el de personas no pertenecientes a este Centro, las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente las opiniones de la Entidad.

© FNC - Cenicafé - FoNC





# Reconocimientos

A los profesionales: Hernán Calle Vélez (QEPD), Germán Valencia Aristizábal, Jaime Zuluaga Vasco, Diego Antonio Zambrano Franco (QEPD), Gloria Inés Puerta Quintero, Gladys Blandón Castaño, María Teresa Dávila Arias, César Augusto Ramírez Gómez, Sandra Liliana Giraldo Buitrago, Ana Cristina Bolaño, Luz Adriana Sanz Cardona, Carmenza Jaramillo López, Maryeimy Varón López, Fernando Alfonso Gómez Cruz, Ana Luz Arango Pastor, Gloria Piedad Alzate Palacio, Lady Juliet Vargas Gutiérrez, Mary Edith Cuarán Carlosama, Carlos Eugenio Oliveros Tascón (QEPD), Juan Rodrigo Sanz Uribe, Carlos Alfonso Tibaduiza Vianchá, Laura Vanessa Quintero Yepes, Adriana Garavito Roza, Sara Ríos Arias, Marisol Giraldo Jaramillo, Pablo Benavides Machado, Aristófeles Ortiz y Juan Carlos López Núñez, por sus aportes de investigación en el área de aprovechamiento y valorización de los subproductos del café.

Agradecimientos al auxiliar de investigación Samuel Antonio Castañeda por el apoyo con parte del material fotográfico.

# Contenido

7

Introducción

10

Balance de materia en el proceso de beneficio e industrialización del café

14

Principales subproductos del proceso de beneficio e industrialización del café

14 Pulpa de café

15 Mucílago de café

18 Cascarilla de café

19 Película plateada de café

20 Borra de café

21 Tallos y ramas de café

22 Granos de café almendra de calidad inferior

24

Elaboración de diferentes productos a partir de los subproductos del proceso de beneficio e industrialización del café

24 Abono orgánico

32 Hongos comestibles y nutraceuticos

44 Ensilaje

48 Pectinas

55 Aceites

60 Miel

64 Levaduras alimenticias

66 Antioxidantes

69 Alimentos para consumo animal

74 Alimentos para consumo humano

78 Biocombustibles

96 Carbón activado

100 Bioplásticos

103 Colorantes

106 Materiales de construcción

110

Manejo del agua en el beneficio del café con cero descargas

120

Modelo integrado de manejo y aprovechamiento de los subproductos del café con la aplicación de los conceptos de la economía circular y biorrefinería

128

Consideraciones finales

132

Literatura citada

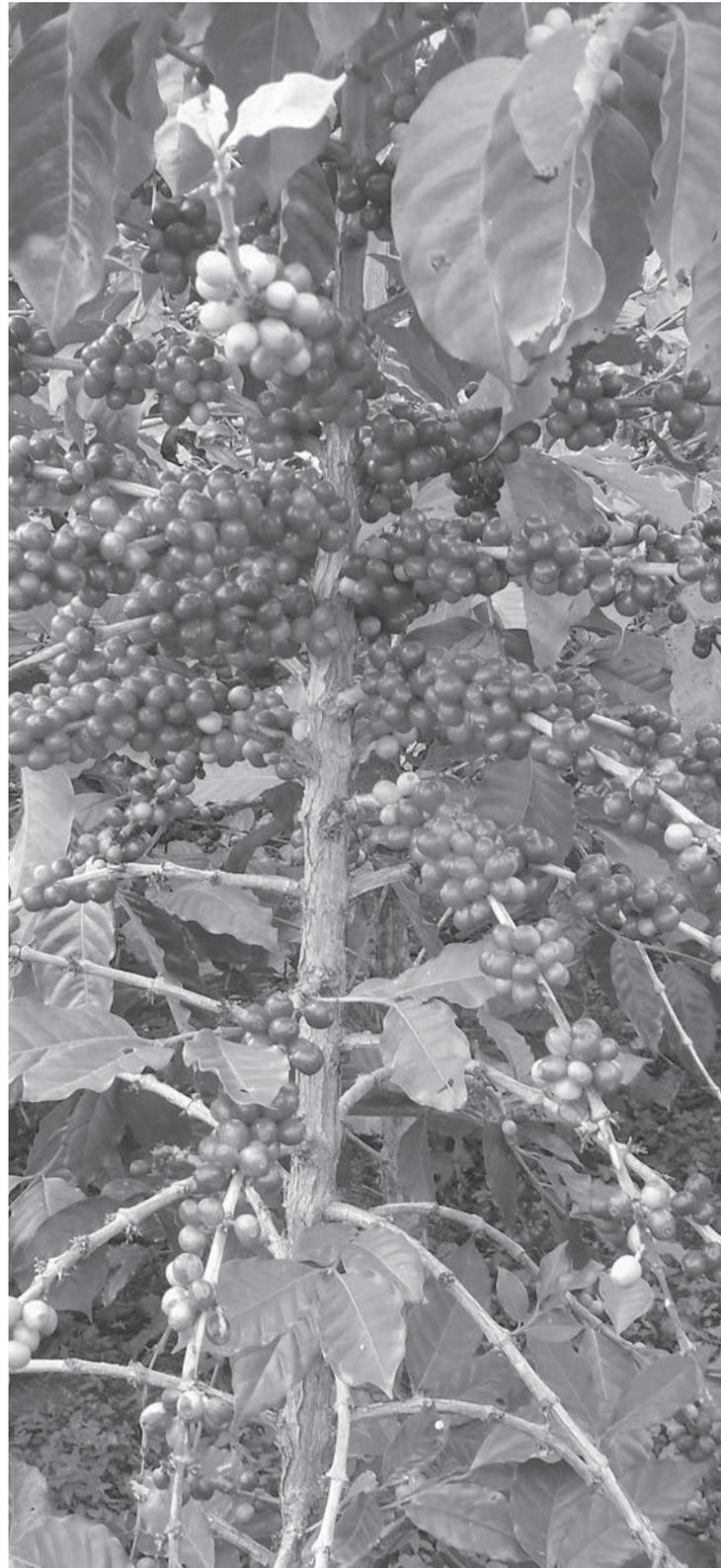


# Introducción

En el cultivo del café, como en la mayoría de los cultivos agrícolas, la biomasa residual representa entre una y cuatro veces más cantidad que el producto principal que se comercializa, lo que justifica todos los esfuerzos e investigaciones que se realicen con el fin de darle un valor agregado a la misma, ya sea para la obtención de alimentos para consumo humano o animal, o para utilizarla directamente como alimento no convencional o como fuente de energía o como materia prima para la obtención de biocombustibles (biogás, bioetanol, biodiésel, biohidrógeno, syngas, biocarbón), abonos orgánicos, colorantes, antioxidantes, productos químicos, bioplásticos, materiales de construcción, entre otros usos, y evitar que impacte de forma negativa los recursos suelo, agua, aire y biodiversidad.

Cenicafé ha realizado investigaciones desde el año 1950, relacionadas con la valorización de los subproductos generados durante las etapas de cosecha, beneficio e industrialización del café, procurando generar diferentes alternativas para la obtención de diversos productos con valor agregado que contribuyan con la rentabilidad del negocio cafetero, tanto por los ingresos obtenidos por su comercialización o por el valor del producto que pueden reemplazar, como por la eliminación de los costos legales ambientales asociados a la disposición y manejo de los residuos.

Entre 1950 y 1977, el investigador Hernán Calle Vélez en Cenicafé, realizó investigaciones relacionadas con el aprovechamiento de los subproductos del café, demostrando que a partir de la pulpa, el mucilago y los rípios de café pueden obtenerse, entre otros, levaduras alimenticias (Calle, 1951), alcohol (Calle, 1951), colorantes (Calle, 1955), biogás (Calle, 1955; Calle, 1974), abono orgánico (López & Calle, 1956; Parra & Calle, 1967), aceites (Calle, 1960), pectinas (Calle, 1962), miel de café (Valencia & Calle, 1968), alimentos para animales (Buitrago et al., 1970; Calle, 1977), baterías eléctricas (Calle, 1973; Calle 1977),



materiales de construcción (Calle, 1977) y productos químicos (Calle, 1977). Sin embargo, aspectos tales como el tipo de beneficio utilizado en la época (uso de agua en las etapas de despulpado y fermentación natural del mucílago), alta dispersión en la generación de los subproductos y las bajas cantidades de subproductos por hectárea, no favorecieron la adopción de los resultados de las investigaciones.

Entre 1977 y 2023, Cenicafé ha realizado investigaciones relacionadas con el aprovechamiento de los subproductos que involucraron el ensilaje (Rodríguez, 2003), la obtención de abono orgánico por lombricultura (Dávila & Ramírez, 1996; Blandón et al., 1999), por procesos de compostaje (Blandón et al., 1998) y larvicompostaje (Cenicafé, 2013), extracción de aceites (López & Castaño, 1999; López, 2007), alimentación de cerdos (Garavito & Puerta, 1998), cultivo de hongos comestibles (Rodríguez & Zuluaga, 1994; Gómez, 1997; Rodríguez & Gómez, 2001; Rodríguez & Jaramillo, 2005b; Rodríguez et al., 2006; Vargas, 2013), cultivo de hongos medicinales (Jaramillo & Rodríguez, 2001; Rodríguez & Jaramillo, 2005a; Alzate, 2007), producción de vino (Giraldo, 1999), producción de alcohol carburante (Rodríguez & Zambrano, 2011; Rodríguez, 2013), producción de biocombustibles (Oliveros et al., 2009; Rodríguez & Zambrano, 2010), extracción de antioxidantes (Ortiz, 2012), producción de gas de síntesis (Oliveros et al., 2017), y producción de proteína animal (Giraldo et al., 2019) y astillado de los tallos de café con fines energéticos (Tibaduiza, 2023).

Investigadores nacionales e internacionales han realizado numerosas investigaciones para la obtención de diversos productos de valor agregado utilizando como materia prima los subproductos del beneficio e industrialización del café, entre los cuales se destacan: té de hojas de café (Ratanamarno & Surbkar, 2017; Novita et al., 2018), té de flores de café (Nguyen et al., 2019), té de pulpa

de café seca (Heeger et al., 2017), bebida instantánea de la pulpa de café (Irrondo-Dehond et al., 2020), té de la almendra sin tostar (Macheiner et al., 2019), conservantes de alimentos (Mirón-Mérida et al., 2019), harina para panificación (Yáñez, 2018; Ponce, 2018; Barrera & Sánchez, 2020; Madrigal & Chavarria, 2020) carbón activado (Nabais, et al., 2008; Zungu et al., 2022; Carnier et al., 2022), colorantes (Díaz & Elías, 2009; Hartati et al., 2012; Villalta, 2016; Camacho & Sánchez, 2022), biohidrógeno (Hernández et al., 2014; Miñón-Fuentes & Aguilar-Juárez, 2019; Villa et al., 2019; Villa et al., 2020; Petrosyan et al., 2020; Renaudie et al., 2022), materiales de construcción (Sierra et al., 2013; Zeledón et al., 2017; Mateus et al., 2018; Segarra, 2020; Botello, 2022), bioplásticos (Venus, 2013; Toala & Sarmiento, 2019; Vargas-García et al., 2021; Camacho & Lizarazo, 2021; Borunda et al., 2021), alimentos para consumo animal (Pinto et al., 2014; Suárez-Machín & Guevara-Rodríguez, 2017; Yoplac et al., 2017) y antioxidantes (Arellano-González et al., 2011; Mirón-Mérida et al., 2019).

En la actualidad, el beneficio ecológico (Roa et al., 1999), las centrales de beneficio y las altas producciones de café por hectárea, favorecen la obtención de los subproductos del café en su estado natural. Adicionalmente, el alto costo de los concentrados para consumo animal, de los fertilizantes químicos y de los combustibles y la necesidad de dar cumplimiento a una legislación ambiental más estricta y exigente, se convierten en aspectos positivos y fundamentales que justifican la obtención de productos de alto valor agregado, utilizando como materia prima los subproductos del proceso de beneficio e industrialización del café, en las áreas de alimentación humana y animal, abonos orgánicos, biocombustibles y farmacéutica, entre otras.

De otro lado, el concepto de Bioeconomía circular definido como: *"Un sistema de producción y consumo que promueve la*

eficiencia en el uso de materiales, agua y energía; teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas y el uso circular de los flujos de materiales a través de la implementación de innovaciones tecnológicas, alianzas y colaboraciones entre actores, y el impulso de modelos de negocio que respondan a los fundamentos del desarrollo sostenible", propone un cambio de paradigma que permite frenar el deterioro del capital natural del planeta y reducir el crecimiento exponencial de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (Figura 1) (DANE, 2020).

En esta publicación se presentan los principales resultados de las investigaciones realizadas en Cenicafé y en el ámbito nacional e internacional para la elaboración de diferentes productos de valor agregado, a partir de los subproductos generados en la cadena de cosecha, beneficio e industrialización del café, detallando los procedimientos de obtención y aplicando los conceptos de Bioeconomía circular para optimizar el aprovechamiento de los subproductos, con el fin de generar beneficios para el productor de café y para el medio ambiente, a través de un proceso de beneficio de café con cero residuos.



Figura 1. Concepto de Bioeconomía circular. Fuente: Adaptado de DANE, 2020.



## Balance de materia en el proceso de beneficio e industrialización del café

El fruto de café está compuesto por una cubierta exterior o exocarpio, denominada "pulpa", la cual determina el color del fruto; en el interior del fruto hay diferentes capas: el mesocarpio, que es de aspecto viscoso denominado "mucilago", el endocarpio que es una cubierta dura de color amarillento que cubre el grano y se denomina "cascarilla o pergamino", la epidermis ver Figura 2., una capa delgada y fina que se conoce como "película plateada" y los granos o semillas que se conocen con el nombre de "café almendra" y que son los que se tuestan para preparar los diferentes tipos de bebidas de café y en cuyo proceso se genera un residuo insoluble que se conoce con el nombre de "ripio o borra". Las partes del fruto de café se detallan en la Figura 2.

En el proceso de beneficio e industrialización del fruto de café se genera una cantidad importante de residuos sólidos y líquidos. Del fruto solamente se utiliza el 8,0% de su peso fresco en la preparación de la bebida, el 92,0% lo constituye la biomasa residual.

En la Tabla 1 se presenta el peso de cada uno de los residuos generados durante cada una de las etapas del proceso de beneficio e industrialización del café y en la Figura 3 se ilustra el proceso.

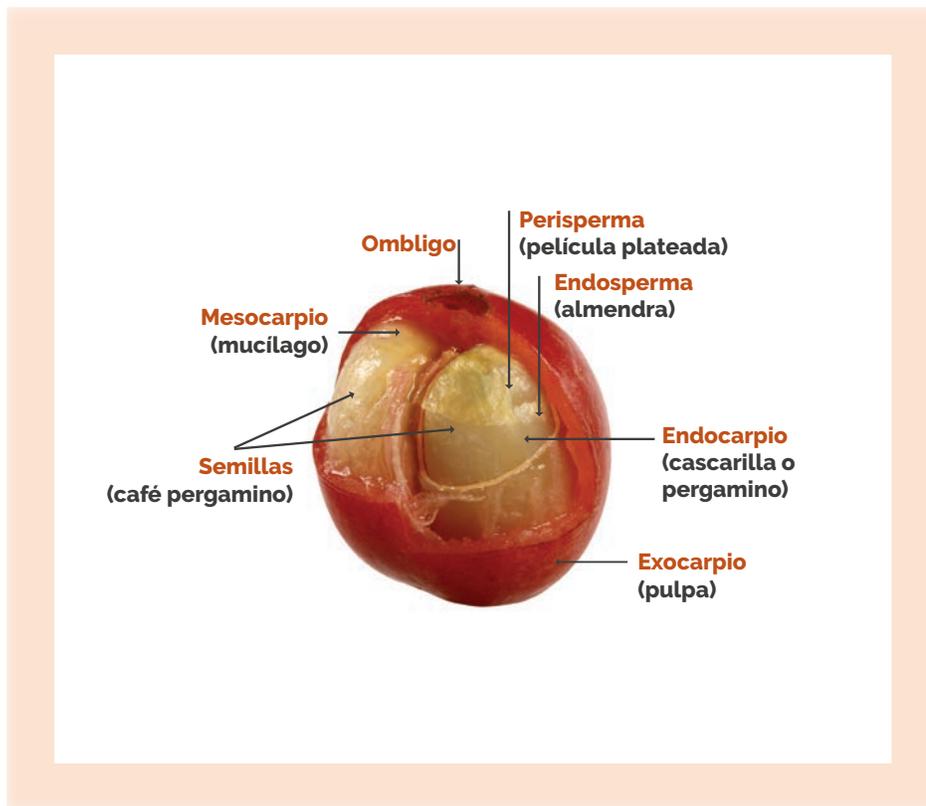


Figura 2. Partes del fruto de café.

FIGURA 1. Residuos obtenidos en el proceso de beneficio e industrialización de 1,0 kg de fruto de café en Colombia. Fuente: Adaptado de Rodríguez (2009).

Etapa	Residuo obtenido	Pérdida (en gramos)
Despulpado	Pulpa	436 (Montilla, 2006)
Desmucilaginado	Mucilago	149 (Montilla, 2006)
Secado	Agua	192 (Adaptado de Roa et al., 1999)
Trilla	Pergamino + Película plateada	44 (Montilla, 2006)
Torrefacción	Volátiles + Película plateada	26 (Adaptado de FNC, 2000)
Preparación de la bebida	Borra	73 (Adaptado de FNC, 2000)
<b>Pérdida acumulada 920 gramos</b>		



Figura 3. Balance de materia en el proceso de beneficio e industrialización del café.





## Principales subproductos del proceso de beneficio e industrialización del café

### • Pulpa de café

La pulpa o exocarpio (Figura 4) es el primer subproducto que se obtiene en el beneficio húmedo del fruto de café y representa, en base húmeda, alrededor del 43,58% del peso del fruto fresco (Montilla, 2006). Se obtiene en la etapa de despulpado en la cual se utilizan máquinas despulpadoras que pueden ser de cilindro horizontal o de cilindro vertical.

Su producción media en Colombia es de 2,60 t ha-año<sup>-1</sup> de pulpa fresca. Por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra que Colombia exporta, se generan aproximadamente 162.900 t de pulpa fresca, la cual si no se almacena y aprovecha adecuadamente produciría una contaminación equivalente a la generada durante un año, en aguas residuales domésticas, por una población de 871.500 habitantes.

En la Tabla 2 se condensan los rangos de valores encontrados para los diversos parámetros evaluados en diferentes caracterizaciones físico-químicas de pulpa de café (*Coffea arabica*) realizadas en Cenicafé. La pulpa de café se caracteriza por tener un alto contenido de humedad entre 76,70% y 79,50%, pH inferior a 4,20, altos contenidos de materia orgánica entre 88,50%



Figura 4. Despuladora y pulpa obtenida en la etapa de despulpado del fruto del café.

y 93,11% (bs), fibra cruda entre 13,17% y 19,40% (bs), celulosa entre 17,70% y 29,51% (bs), lignina entre 16,85% y 17,50% (bs), contenidos de N entre 1,25% y 1,70% (bs), P entre 0,10 y 0,25% (bs) y K entre 1,77% y 3,03%, (bs).

Su composición química la hace apropiada como materia prima para la elaboración de abonos orgánicos, producción de proteína animal, cultivo de hongos comestibles y medicinales, producción de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos, elaboración de pectinas, plásticos, cartón, y la producción de bebidas estimulantes, entre otros usos.

## • Mucílago de café

El mucílago o mesocarpio (Figura 5) es el segundo subproducto que se genera durante el proceso de beneficio del fruto de café y representa, en base húmeda, alrededor del 14,85% del peso del fruto fresco (Montilla, 2006). Se obtiene, sin degradar, en la etapa

de desmucilaginado mediante el uso de desmucilagadores mecánicos o productos enzimáticos o ya degradado en los tanques utilizados en el proceso de fermentación.

En términos de volumen, por cada kilogramo de fruto de café se producen 91 mL de mucílago puro (Zambrano e Isaza, 1994). Su producción media en Colombia es de 0,89 t ha-año<sup>-1</sup> de mucílago fresco.

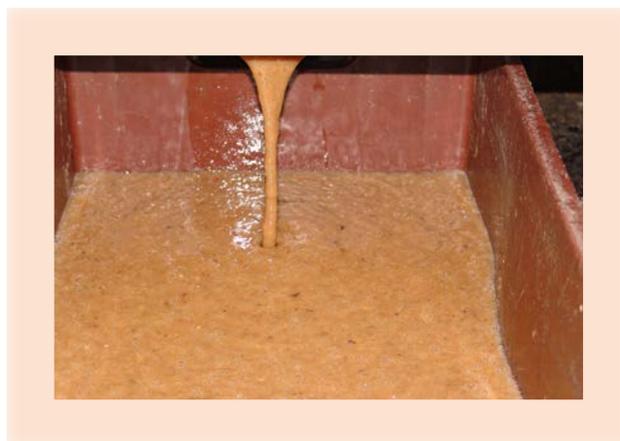
Por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra que Colombia exporta, se generan aproximadamente 55.510 toneladas de mucílago fresco, el cual si no se utiliza adecuadamente produciría una contaminación equivalente a la generada durante un año, en aguas residuales domésticas, por una población de 307.250 habitantes.

En la Tabla 3 se condensan los rangos de valores encontrados para los diversos parámetros evaluados en diferentes

**Tabla 2.** Composición química de la pulpa de café fresca (*Coffea arabica*).

Parámetro	Rango de valores
pH	3,60 - 4,20
Humedad (%)	76,70 - 79,50
Materia seca (%)	20,50 - 23,30
Materia orgánica (% bs)	88,50 - 93,11
Nitrógeno (% bs)	1,25 - 1,70
Cenizas (% bs)	6,44 - 10,50
Fibra (% bs)	13,17 - 19,40
Grasa (% bs)	2,39 - 5,78
Celulosa (% bs)	17,70 - 29,51
Hemicelulosa (% bs)	2,30 - 4,63
Lignina (% bs)	16,85 - 17,50
Cafeína (% bs)	0,75 - 2,26
Taninos (% bs)	3,70 - 7,73
Azúcares reductores (% bs)	12,40 - 20,58
Azúcares no reductores (% bs)	2,00 - 4,77
K (% bs)	1,77 - 3,03
Ca (% bs)	0,25 - 0,55
Mg (% bs)	0,05 - 0,14
P (% bs)	0,10 - 0,25
Fe (% bs)	0,008 - 0,03
C/N	31,00 - 31,50

(% bs): Porcentaje en base seca (C/N) Relación carbono/Nitrógeno.



**Figura 5.** Desmucilaginator y mucílago obtenido en la etapa de desmucilaginado del fruto del café.

**Tabla 3.** Composición química del mucílago de café fresco (*Coffea arabica*).

Parámetro	Rango de valores
pH	4,80 - 5,00
Brix (°)	10 - 11
Humedad (%)	88,60 - 90,40
Materia seca (%)	9,60 - 11,40
Cenizas (% bs)	2,95 - 4,62
Nitrógeno (% bs)	1,40 - 1,76
Grasa (% bs)	0,86 - 1,45
Azúcares totales (% bs)	61,23 - 70,48
Azúcares reductores (% bs)	37,91 - 47,90
Azúcares no reductores (%; bs)	20,00 - 29,80
Fibra (% bs)	5,38 - 7,46
Sustancias pecticas (% bs)	5,39 - 17,45
K (% bs)	1,53 - 1,60
Ca (%. bs)	0,18 - 0,24
Mg (% bs)	0,07 - 0,09
Mn (% bs)	0,003 - 0,005
Fe (% bs)	0,03 - 0,05
P (% bs)	0,10 - 0,12
Cu (% bs)	0,002 - 0,003
Zn (% bs)	0,007 - 0,009

(% bs): Porcentaje en base seca

caracterizaciones físico-químicas del mucílago de café (*Coffea arabica*) realizadas en Cenicafé. El mucílago de café se caracteriza por tener un alto contenido de humedad entre 88,60% y 90,40%, un valor de pH en el rango ácido entre 4,80 y 5,00, altos contenidos de azúcares totales entre 61,23% y 70,48% (bs), de los cuales aproximadamente las 2/3 partes son azúcares reductores y 1/3 parte son azúcares no reductores, bajos contenidos de cenizas entre 2,95% y 4,62% (bs), bajos contenidos de grasas entre 0,86% y 1,45% (bs), bajos contenidos de fibra entre 5,38% y 7,46% (bs), contenidos de sustancias

pecticas entre 5,39% y 17,45% (bs), contenidos de N entre 1,40% y 1,76% (bs), similares a los encontrados en la pulpa de café, contenidos de P entre 0,10% y 0,12% (bs) y contenidos de K entre 1,53% y 1,60% (bs).

Su composición química lo hace apropiado como materia prima para la producción de alimentos para consumo animal, biocombustibles líquidos y gaseosos, elaboración de pectinas, plásticos y producción de bebidas estimulantes, entre otros usos.

## • Cascarilla de café

La cascarilla o endocarpio (Figura 6) es el tercer subproducto que se genera durante la transformación del fruto de café a café almendra y representa, en base húmeda, alrededor del 4,4% del peso del fruto fresco (Montilla, 2006). Se obtiene en la etapa de trilla en la cual se utilizan máquinas trilladoras para retirar la cascarilla o "pergamino" adherido al grano de café.

Por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra que Colombia exporta, se generan aproximadamente 16.450 toneladas de cascarilla. En la Tabla 4 se presentan los rangos de valores encontrados para los diversos parámetros evaluados en diferentes caracterizaciones físico-químicas de la cascarilla de café (*Coffea arabica*) realizadas

en Cenicafé. La cascarilla de café se caracteriza por tener un bajo contenido de humedad entre 7,20% y 11,85%, un valor de pH en el rango cercano al neutro entre 6,00 y 6,50, altos contenidos de fibra entre 65,00% y 69,00% (bs), altos contenidos de celulosa entre 50,20% y 57,00% (bs), altos contenidos de lignina entre 20,60% y 24,40% (bs), bajos contenidos de cenizas entre 0,50% y 3,40% y bajos contenidos de grasa entre 0,37% y 0,60% (bs).

Su composición química la hace apropiada como materia prima para la producción de hongos comestibles y medicinales, producción de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos, productos de panadería, cartón, plásticos, carbón activado, materiales de construcción y algunos productos químicos, entre otros usos.



Figura 6. Trilladora y cascarilla obtenida en la etapa de trilla.

**Tabla 4.** Composición química de la cascarilla de café (*Coffea arabica*).

Parámetro	Rango de valores
pH	6,00 – 6,50
Humedad (%)	7,20 – 11,85
Materia seca (%)	88,15 - 92,80
Nitrógeno (% bs)	0,39 – 0,51
Cenizas (% bs)	0,50 – 3,40
Fibra (% bs)	65,00 - 69,00
Grasa (% bs)	0,37 – 0,60
Lignina (% bs)	20,60 - 24,40
Celulosa (% bs)	50,20 - 57,00
P (% bs)	0,003 – 0,01
K (% bs)	0,18 – 0,22
Ca (% bs)	0,02 – 0,15
Mg (% bs)	0,05 – 0,12
Fe (% bs)	0,11 – 0,12
Mn (% bs)	0,002 – 0,003
Zn (% bs)	0,002 – 0,003
Cu (% bs)	0,001 – 0,002
B (% bs)	0,001 – 0,002

(% bs): Porcentaje en base seca

## • Película plateada de café

La película plateada (Figura 7) se obtiene en las etapas de trilla y torrefacción del grano de café. Representa, en base húmeda, alrededor del 0,17% del peso del fruto fresco.

Por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra, se generan aproximadamente 635 toneladas de película plateada. En la Tabla 5 se condensan los rangos de valores reportados por Sánchez & Anzola (2012) para diversos parámetros evaluados en diferentes

caracterizaciones físico-químicas de la película plateada de café (*Coffea arabica*). La película plateada de café se caracteriza por tener un bajo contenido de humedad, entre 6,16% y 7,30%, un valor de pH en el rango neutro entre 6,00 y 7,00, altos contenidos de fibra insoluble entre 53,70% y 66,88% (bs), altos contenidos de carbohidratos totales entre 62,10% y 72,87% (bs), bajos contenidos de cenizas entre 5,59% y 7,00% (bs) y bajos contenidos de grasa entre 2,11 y 2,82% (bs).

Su composición química la hace apropiada como materia prima para la producción de hongos comestibles y medicinales, elaboración de té, productos de panadería y fuente de fibra dietética, entre otros usos.



**Figura 7.** Tostadora y película plateada obtenida en la etapa de torrefacción.

**Tabla 5.** Composición química de la película plateada de café (*Coffea arabica*). Fuente: Adaptado de Sánchez & Anzola, 2012.

Parámetro	Rango de valores
pH	6,00 - 7,00
Humedad (%)	6,16 - 7,30
Materia seca (%)	92,70- 93,84
Nitrógeno (% bs)	1,89 - 2,98
Cenizas (% bs)	5,59 - 7,00
Fibra insoluble (% bs)	53,70 - 66,88
Fibra soluble (% bs)	3,27 - 8,80
Grasa (% bs)	2,11 - 2,82
Azúcares reductores (% bs)	2,63 - 2,94
Carbohidratos totales (% bs)	62,10 - 72,87

(% bs): Porcentaje en base seca

## • Borra de café

La borra o ripio del café (Figura 8) se obtiene en el proceso industrial de elaboración del café soluble o en la etapa de preparación de

la bebida a partir del café tostado y molido. Representa, en base húmeda, alrededor del 7,30% del peso del fruto fresco.

Por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra, se generan aproximadamente 27.300 toneladas de borra. En la Tabla 6 se condensan los rangos de valores encontrados para los diversos parámetros evaluados en diferentes caracterizaciones físico-químicas de la borra de café (*Coffea arabica*) realizadas en Cenicafé. La borra de café se caracteriza por tener un valor de pH en el rango ácido entre 4,00 y 5,00 altos contenidos de fibra entre 35,47% y 43,39% (bs), altos contenidos de grasa entre 22,42% y 26,32% (bs), bajos contenidos de cenizas entre 0,40% y 0,61% (bs).

Su composición química la hace apropiada como materia prima para la producción de hongos comestibles y medicinales, producción de abono orgánico, producción de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos, aceites, productos de panadería, carbón activado y como fuente de fibra dietética, entre otros usos.



Figura 8. Extracción de solubles del café tostado y molido y ripio obtenido.

Tabla 6. Composición química de la borra de café (*Coffea arabica*).

Parámetro	Rango de Valores
pH	4,00 – 5,00
Humedad (%)	60,00 – 68,00
Materia seca (% bs)	32,00 – 40,00
Nitrógeno (% bs)	1,56 – 1,92
Cenizas (% bs)	0,40 – 0,61
Fibra (% bs)	35,47- 43,39
Grasa (% bs)	22,42 – 26,32
P (% bs)	0,01 – 0,02
K (% bs)	0,01 – 0,08
Ca (% bs)	0,08 – 0,09
Mg (% bs)	0,01 – 0,02
Fe (% bs)	0,02 – 0,05
Mn (% bs)	0,003 – 0,004
Zn (% bs)	0,001 – 0,002
Cu (% bs)	0,001- 0,004
B (% bs)	0,0005 – 0,001

(% bs): Porcentaje en base seca

## • Tallos y ramas de café

El cultivo del café requiere de renovaciones periódicas de los árboles, después que alcanzan su pleno desarrollo, si se quiere mantener un promedio alto y rentable de producción por unidad de superficie. De los diferentes sistemas de renovación de los cafetales, el zoqueo es una técnica sencilla y económica que consiste en cortar el árbol a una altura aproximada de 30 cm sobre el suelo (Cenicafé, 1992), generando como subproductos de la práctica los tallos (Figura 9) y las ramas de los árboles zoqueados. La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, para mantener una caficultura productiva, promueve ciclos de renovación cada cinco años y reporta un promedio de densidad de 5.263 árboles/ha (FNC, 2021). Farfán, (1994), durante el proceso de renovación reporta una producción de madera seca de 16 toneladas/ha, para una densidad de 5.000 árboles/ha, lo que permite calcular un promedio de producción, relacionándolo con el fruto de café, de 0,54 kg de tallos de café por 1 kg de fruto procesado.



**Figura 9.** Zoqueo del árbol de café y tallos obtenidos.

En la Tabla 7 se presentan los resultados de una caracterización físico-química realizada a tallos de café (*Coffea arabica*) realizada en Cenicafé. Los tallos de café se caracterizan por tener un valor de pH ligeramente ácido de 5,85, altos contenidos de fibra de 64,54% (bs), bajos contenidos de grasa de 0,40% (bs) y bajos contenidos de cenizas de 3,53% (bs).

Su composición química los hace apropiados como materia prima para la producción de hongos comestibles y medicinales, la

**Tabla 7.** Composición química de los tallos de café (*Coffea arabica*).

Parámetro	Valor
pH	5,85
Humedad (%)	42,87
Materia seca (%)	57,13
Nitrógeno (% bs)	0,72
Cenizas (% bs)	3,53
Fibra (% bs)	64,54
Grasa (% bs)	0,40
P (% bs)	0,06
K (% bs)	0,37
Ca (% bs)	0,40
Mg (% bs)	0,08
Fe (% bs)	0,075
Mn (% bs)	0,004
Zn (% bs)	0,001
Cu (% bs)	0,001
B (% bs)	0,001

(% bs): Porcentaje en base seca

producción de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos, la elaboración de tabletas y pisos de madera, entre otros usos.

## • Granos de café almendra de calidad inferior

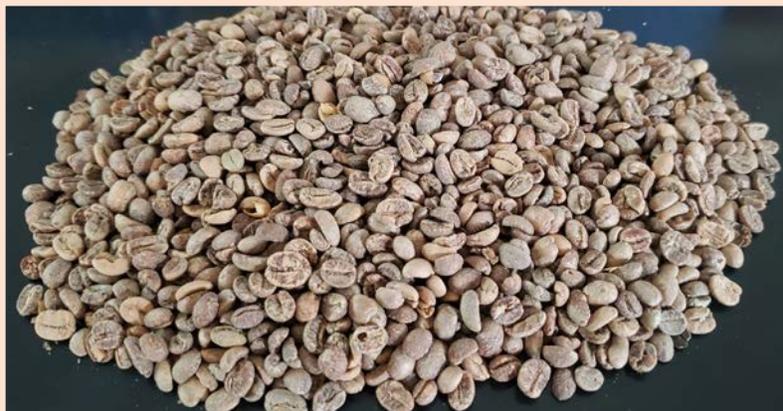
Los granos de café almendra de calidad inferior (Figura 10) son aquellos que no cumplen con los requerimientos de calidad del café estándar y se conocen popularmente como "pasillas", dado que su precio de comercialización es muy inferior al del café

estándar, son valorados como materia prima para la elaboración de diversos productos. En la Tabla 8 se condensan los rangos de valores encontrados para los diversos parámetros evaluados en diferentes caracterizaciones físico-químicas de las almendras de café (*Coffea arabica*) realizadas en Cenicafé. Los granos de café almendra de calidad inferior se caracterizan por tener un valor de pH ligeramente ácido entre 5,60 y 6,00, altos contenidos de grasa entre 13,07% y 15,27% (bs), altos contenidos de ácido clorogénico

**Tabla 8.** Composición química de los granos de café almendra (*Coffea arabica*).

Parámetro	Rango de valores
pH	5,60 – 6,00
Humedad (%)	9,81 - 11,00
Nitrógeno (% bs)	1,96 – 2,37
Cenizas (% bs)	3,39 – 4,78
Fibra (% bs)	16,00 – 23,84
Grasa (% bs)	13,07 – 15,27
Cafeína (% bs)	1,13 - 1,30
Ácido clorogénico (% bs)	6,65 – 7,55
P (% bs)	0,15- 0,16
K (% bs)	1,20 – 1,70
Ca (% bs)	0,12 - 0,23
Mg (% bs)	0,18 – 0,50
Fe (% bs)	0,035 - 0,064
Mn (% bs)	0,003 - 0,004
Zn (% bs)	0,001 - 0,003
Cu (% bs)	0,002 - 0,004
B (% bs)	0,001 – 0,003

(% bs): Porcentaje en base seca



**Figura 10.** Café almendra de calidad inferior y producto obtenido de su molienda.

entre 6,65% y 7,55% (bs) y altos contenidos de cafeína entre 1,13% y 1,30% (bs).

Su composición química los hace apropiados como materia prima para la producción de hongos comestibles y medicinales, como suplemento dietético, para la elaboración de té, harina, aceite, entre otros usos.



# Elaboración de diferentes productos a partir de los subproductos del proceso de beneficio e industrialización del café

## • Abono orgánico

Con este nombre se define al material que se obtiene de la degradación y mineralización de la materia orgánica presente en residuos animales y vegetales y que se aplica al suelo con el objetivo de mejorar sus propiedades físicas y sus características químicas y biológicas, buscando incrementar el rendimiento de los cultivos. El abono orgánico puede obtenerse a partir de procesos de compostaje, lombricompostaje o larvicompostaje. En el caso de los subproductos del café se ha utilizado la pulpa de café sola y mezclada con mucilago, como materia prima para la elaboración de abono orgánico, y se ha considerado como criterio para dar por terminado el proceso de transformación una relación C/N menor a 12 en el producto final.

### Obtención de abono orgánico por procesos de compostaje de la pulpa de café sola y mezclada con mucilago.

Consiste en la transformación de los sustratos en abono orgánico a través de volteos periódicos de la masa, que deben efectuarse cada 15 días, como mínimo, para lograr su

descomposición en un tiempo entre 4 y 6 meses (Uribe, 1977). El compostaje se define como la descomposición biológica y estabilización de sustratos orgánicos por parte de microorganismos. En el proceso se generan temperaturas termófilas debido a la producción de calor por los microorganismos, obteniéndose como resultado un producto estable, higiénico, semejante a un manto rico en sustancias húmicas, que se utiliza como abono orgánico y acondicionador de suelos, sin causar impacto negativo sobre el ambiente. Investigaciones realizadas en Cenicafé han permitido determinar rendimientos del proceso de compostaje del 16,6%, en base seca, (Blandón et al., 1998) en 4 meses, realizando dos volteos semanales (Figura 11). En la Tabla 9 se presenta una caracterización de la composición físico-



**Figura 11.** Compostaje de la pulpa de café.

química del proceso de compostaje de la pulpa sola y mezclada con mucilago, y en la Tabla 10 se presenta una caracterización de su riqueza microbiológica, cuantificando grupos

**Tabla 9.** Caracterización físico-química de la pulpa sola y mezclada con mucilago durante el proceso de compostaje. Fuente: Blandón et al., 1998.

Parámetro	Compostaje - Pulpa de café sola		Compostaje - Pulpa de café mezclada con mucilago	
	Sustrato inicial	Abono	Sustrato inicial	Abono
Humedad (%)	74,83	52,83	87,90	55,50
pH (unidades)	4,40	8,32	4,13	7,95
Cenizas (% bs)	6,66	45,56	7,30	20,65
Grasas (% bs)	1,60	0,27	2,00	0,31
Fibra (% bs)	11,43	26,48	17,16	24,85
N (% bs)	1,76	4,24	1,94	3,98
MO (% bs)	93,34	54,44	92,70	79,36
C/N	30,72	7,47	27,95	11,62
P (% bs)	0,13	0,27	0,13	0,25
K (% bs)	2,82	5,27	2,75	4,10
Ca (% bs)	0,32	0,91	0,37	1,18
Mg (% bs)	0,08	0,19	0,11	0,26
Fe (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	158,75	3.413,33	700,00	3.425,00
Mn (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	69,00	155,17	43,00	169,25
Zn (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	8,25	158,83	45,75	162,58
Cu (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	9,75	14,67	17,75	40,42
B (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	21,75	65,33	18,75	64,33

(% bs): Porcentaje en base seca

**Para una finca que produzca 1.000 @ de cps, se generan aproximadamente 27 toneladas de pulpa fresca, de las cuales se producen, mediante el proceso de compostaje, 1,1 toneladas de abono orgánico (en base seca) de fórmula 21 N – 3 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 26 K<sub>2</sub>O.**

**Tabla 10.** Caracterización microbiológica de la pulpa sola y mezclada con mucilago durante el proceso de compostaje. Fuente: Blandón et al., 1998

Compostaje pulpa de café sola		Compostaje Pulpa de café mezclada con mucilago	
Géneros de microorganismos presentes			
Sustrato inicial	Abono	Sustrato inicial	Abono
<i>Candida</i> spp. (H) <i>Citrobacter</i> spp. (B) <i>Enterobacter</i> spp. (B) <i>Escherichia</i> spp. (B) <i>Hafnia</i> spp. (B) <i>Rhodotorula</i> spp. (L) <i>Serratia</i> spp. (B) <i>Staphylococcus</i> spp. (B) <i>Streptomyces</i> spp. (A) <i>Torulopsis</i> spp. (L)	<i>Actinomadura</i> spp. (A) <i>Achromobacter</i> spp. (B) <i>Aspergillus</i> spp. (H) <i>Enterobacter</i> spp. (B) <i>Escherichia</i> spp. (B) <i>Flavobacterium</i> spp. (B) <i>Geotrichum</i> spp. (H) <i>Penicillium</i> spp. (H) <i>Proteus</i> spp. (B) <i>Rhodotorula</i> spp. (L) <i>Serratia</i> spp. (B) <i>Staphylococcus</i> spp. (B) <i>Streptomyces</i> spp. (A) <i>Vibrio</i> spp. (B) <i>Xanthomonas</i> spp. (B) <i>Yersinia</i> spp. (B)	<i>Acinetobacter</i> spp. (B) <i>Alcaligenes</i> spp. (B) <i>Candida</i> spp. (H) <i>Citrobacter</i> spp. (B) <i>Enterobacter</i> spp. (B) <i>Escherichia</i> spp. (B) <i>Flavobacterium</i> spp. (B) <i>Klebsiella</i> spp. (B) <i>Proteus</i> spp. (B) <i>Pseudomonas</i> spp. (B) <i>Rhodotorula</i> spp. (L) <i>Saccharomyces</i> spp. (L) <i>Serratia</i> spp. (B) <i>Staphylococcus</i> spp. (B) <i>Torulopsis</i> spp. (L)	<i>Actinomadura</i> spp. (A) <i>Aspergillus</i> spp. (H) <i>Bacilos gram (+)</i> (B) <i>Candida</i> spp. (H) <i>Chromobacterium</i> spp. (B) <i>Flavimonas</i> spp. (B) <i>Flavobacterium</i> spp. (B) <i>Fusarium</i> spp. (H) <i>Geotrichum</i> spp. (H) <i>Intrasporangium</i> spp. (A) <i>Mucor</i> spp. (H) <i>Nocardia</i> spp. (A) <i>Penicillium</i> spp. (H) <i>Pseudomonas</i> spp. (B) <i>Rhodotorula</i> spp. (L) <i>Saccharopolyspora</i> spp. (A) <i>Serratia</i> spp. (B) <i>Streptomyces</i> spp. (A) <i>Shewanella</i> spp. (B) <i>Torulopsis</i> spp. (L) <i>Xanthomonas</i> spp. (B)
Aerobios mesófilos: 4,6 x 10 <sup>7</sup> UFC/g	Aerobios mesófilos: 2,0 x 10 <sup>10</sup> UFC/g	Aerobios mesófilos: 1,8 x 10 <sup>6</sup> UFC/g	Aerobios mesófilos: 4,5 x 10 <sup>10</sup> UFC/g
Actinomicetos: 1,1 x 10 <sup>7</sup> UFC/g	Actinomicetos: 2,4 x 10 <sup>8</sup> UFC/g	Actinomicetos: 0 UFC/g	Actinomicetos: 2,1 x 10 <sup>7</sup> UFC/g
Hongos y levaduras: 3,1 x 10 <sup>8</sup> UFC/g	Hongos y levaduras: 2,5 x 10 <sup>5</sup> UFC/g	Hongos y levaduras: 2,1 x 10 <sup>7</sup> UFC/g	Hongos y levaduras: 3,5 x 10 <sup>5</sup> UFC/g
Coliformes totales: 1.100 NMP/g	Coliformes totales: 1.100 NMP/g	Coliformes totales: 67 NMP/g	Coliformes totales: 1.100 NMP/g
Coliformes fecales: 1.100 NMP/g	Coliformes fecales: 1.100 NMP/g	Coliformes fecales: 0 NMP/g	Coliformes fecales: 0 NMP/g

(A): Actinomiceto. (B): Bacteria. (H): Hongo. (L): Levadura

funcionales e identificando los géneros de los microorganismos presentes en los sustratos iniciales y en los abonos obtenidos.

### Obtención de abono orgánico a partir de lombricompostaje de la pulpa de café sola y mezclada con mucilago.

El lombricompostaje puede considerarse como un proceso especial de compostaje, en el que participan tanto lombrices como los microorganismos presentes en el sustrato. La lombriz roja *Eisenia foetida* es la más utilizada en estos procesos, de los cuales se obtiene, de una parte, el lombricompostado (material procesado o estiércol de la lombriz), que puede usarse como un fertilizante biológico y biomasa viva de lombrices que puede utilizarse como pie de cría para nuevos lombricultivos, o como fuente de proteína para alimentación animal (Gómez, 1994).

En estos sistemas de manejo puede utilizarse pulpa de café sola, o en mezcla con mucilago, proveniente de beneficiaderos que utilicen despulpado sin agua, desmucilaginado mecánico y mezcla de los dos subproductos por medio de un tornillo sin fin.

En Cenicafé, Dávila & Ramírez (1996) demostraron que la lombricultura permite acelerar el proceso de transformación de la pulpa, disminuir la mano de obra y mejorar los rendimientos, utilizando diferentes sistemas de manejo como: lechos en guadua, esterilla, ladrillo y cajas plásticas, en los cuales se encontró que 25 toneladas de pulpa fresca, pueden manejarse en un área efectiva de 25 m<sup>2</sup> de lombricultivo, en el año, con una densidad de lombriz pura de 5 kg m<sup>-2</sup>; es decir, que puede manejarse alrededor de una tonelada de pulpa de café en un metro cuadrado de lombricultivo al año. Los resultados de las investigaciones permitieron determinar rendimientos medios de 37,50%, en base seca, en 4 meses de proceso (Figura 12).

En lombricultivos alimentados con la mezcla pulpa – mucilago de café, se observaron mayores incrementos en el peso de lombrices, tasas de consumo del sustrato y rendimientos en la conversión de pulpa en lombricompostado que en aquellos alimentados con pulpa sola (Blandón et al., 1999). El lombricompostado obtenido por sus características físico-químicas y su gran riqueza microbiológica representa un buen abono orgánico (Blandón et al., 1999),



Figura 12. Lombricultura con pulpa de café.

el cual se ha utilizado para preparación de almácigos de café. En la Tabla 11 se presenta una caracterización de la composición físico-química del proceso de lombricompostaje de la pulpa sola y mezclada con mucilago y en la Tabla 12 se presenta una caracterización de su riqueza microbiológica, cuantificando grupos funcionales e identificando los géneros de los microorganismos presentes en los sustratos iniciales y en los lombricompuestos obtenidos.

Las investigaciones llevadas a cabo en Cenicafé permitieron determinar los parámetros óptimos del proceso de lombricultura:

- Densidad de lombrices de 5 kg m<sup>-2</sup>
- Espesor máximo de la capa de pulpa de 4 cm (17 kg de pulpa m<sup>-2</sup>)
- Alimentación semanal del lombricultivo con pulpa de café de una semana o más de generada.

Bajo estas condiciones se determinó que la lombriz consume, en pulpa, la mitad de su peso al día, es decir, 2,5 kg m<sup>-2</sup>-d<sup>-1</sup> y que el incremento de su biomasa es del 50% en 2,3 meses, equivalente a 13 kg m<sup>-2</sup>-año<sup>-1</sup>, la cual puede utilizarse en alimentación animal (gallinas ponedoras, pollos de engorde y piscicultura) dado que su contenido de proteína es superior al 60% (Ferruzzi, 1987).

**Tabla 11.** Caracterización físico-química de la pulpa sola y mezclada con mucilago durante el proceso de lombricompostaje. Fuente: Blandón et al., 1998

Parámetro	Lombricompostaje con pulpa de café sola		Lombricompostaje con pulpa de café mezclada con mucilago	
	Sustrato inicial	Lombricompuesto	Sustrato inicial	Lombricompuesto
Humedad (%)	74,83	78,05	87,90	79,48
pH (unidades)	4,40	8,63	4,13	9,33
Cenizas (% bs)	6,66	44,06	7,30	50,21
Grasas (% bs)	1,60	0,16	2,00	0,20
Fibra (% bs)	11,43	12,55	17,16	16,84
N (% bs)	1,76	3,72	1,94	4,14
MO (% bs)	93,34	55,94	92,70	49,79
C/N	30,72	8,73	27,95	6,98
P (% bs)	0,13	0,44	0,13	0,31
K (% bs)	2,82	9,64	2,75	5,50
Ca (% bs)	0,32	1,15	0,37	1,30
Mg (% bs)	0,08	0,21	0,11	0,25
Fe (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	158,75	3.062,50	700,00	2.201,67
Mn (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	69,00	163,33	43,00	179,83
Zn (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	8,25	149,17	45,75	118,67
Cu (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	9,75	6,92	17,75	7,33
B (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	21,75	73,67	18,75	67,08

(% bs): Porcentaje en base seca

**Para una finca que produzca 1.000 @ de cps, se generan aproximadamente 27 toneladas de pulpa fresca, de las cuales se producen, mediante el proceso de lombricompostaje, 2,5 toneladas de abono orgánico (en base seca) de fórmula  $19 N - 5 P_2O_5 - 48 K_2O$ .**

**FIGURA 12.** Caracterización microbiológica de la pulpa sola y mezclada con mucilago durante el proceso de lombricompostaje. Fuente: Blandón et al., 1999.

Lombricompostaje - Pulpa de café sola		Lombricompostaje - Pulpa de café mezclada con mucilago	
Géneros de microorganismos presentes			
Sustrato inicial	Lombricompuesto	Sustrato inicial	Lombricompuesto
<i>Candida</i> spp. (H) <i>Citrobacter</i> spp. (B) <i>Enterobacter</i> spp. (B) <i>Escherichia</i> spp. (B) <i>Hafnia</i> spp. (B) <i>Rhodotorula</i> spp. (L) <i>Serratia</i> spp. (B) <i>Staphylococcus</i> spp. (B) <i>Streptomyces</i> spp. (A) <i>Torulopsis</i> spp. (L)	<i>Actinomadura</i> spp. (A) <i>Aeromonas</i> spp. (B) <i>Aspergillus</i> spp. (H) <i>Bacilos gram</i> (+) (B) <i>Citrobacter</i> spp. (B) <i>Cladosporium</i> spp. (H) <i>Chromobacterium</i> spp. (B) <i>Enterobacter</i> spp. (B) <i>Escherichia</i> spp. (B) <i>Flavobacterium</i> spp. (B) <i>Fusarium</i> spp. (H) <i>Geotrichum</i> spp. (H) <i>Klebsiella</i> spp. (B) <i>Penicillium</i> spp. (H) <i>Providencia</i> spp. (B) <i>Pseudomonas</i> spp. (B) <i>Streptomyces</i> spp. (A) <i>Xanthomonas</i> spp. (B)	<i>Acinetobacter</i> spp. (B) <i>Alcaligenes</i> spp. (B) <i>Candida</i> spp. (H) <i>Citrobacter</i> spp. (B) <i>Enterobacter</i> spp. (B) <i>Escherichia</i> spp. (B) <i>Flavobacterium</i> spp. (B) <i>Klebsiella</i> spp. (B) <i>Proteus</i> spp. (B) <i>Pseudomonas</i> spp. (B) <i>Rhodotorula</i> spp. (L) <i>Saccharomyces</i> spp. (L) <i>Serratia</i> spp. (B) <i>Staphylococcus</i> spp. (B) <i>Torulopsis</i> spp. (L)	<i>Aeromonas</i> spp. (B) <i>Aspergillus</i> spp. (H) <i>Bacilos gram</i> (+) (B) <i>Citrobacter</i> spp. (B) <i>Cladosporium</i> spp. (H) <i>Chromobacterium</i> spp. (B) <i>Enterobacter</i> spp. (B) <i>Flavobacterium</i> spp. (B) <i>Fusarium</i> spp. (H) <i>Geotrichum</i> spp. (H) <i>Hafnia</i> spp. (B) <i>Intrasporangium</i> spp. (A) <i>Klebsiella</i> spp. (B) <i>Nocardia</i> spp. (A) <i>Penicillium</i> spp. (H) <i>Plesiomonas</i> spp. (B) <i>Pseudomonas</i> spp. (B) <i>Saccharomyces</i> spp. (L) <i>Sarcina</i> spp. (B) <i>Serratia</i> spp. (B) <i>Staphylococcus</i> spp. (B) <i>Streptomyces</i> spp. (A) <i>Torula</i> spp. (L) <i>Vibrio</i> spp. (B)
Aerobios mesófilos: $4,6 \times 10^7$ UFC/g	Aerobios mesófilos: $1,4 \times 10^{11}$ UFC/g	Aerobios mesófilos: $1,8 \times 10^6$ UFC/g	Aerobios mesófilos: $7 \times 10^{10}$ UFC/g
Actinomicetos: $1,1 \times 10^7$ UFC/g	Actinomicetos: $3,3 \times 10^7$ UFC/g	Actinomicetos: 0 UFC/g	Actinomicetos: $1,2 \times 10^7$ UFC/g
Hongos y levaduras: $3,1 \times 10^8$ UFC/g	Hongos y levaduras: $2,7 \times 10^5$ UFC/g	Hongos y levaduras: $2,1 \times 10^7$ UFC/g	Hongos y levaduras: $6,9 \times 10^5$ UFC/g
Coliformes totales: 1.100 NMP/g	Coliformes totales: 890 NMP/g	Coliformes totales: 67 NMP/g	Coliformes totales: 475 NMP/g
Coliformes fecales: 1.100 NMP/g	Coliformes fecales: 734 NMP/g	Coliformes fecales: 0 NMP/g	Coliformes fecales: 681 NMP/g

(A): Actinomiceto. (B): Bacteria. (H): Hongo. (L): Levadura

### Obtención de abono orgánico a partir de larvicompostaje de la pulpa de café sola y mezclada con aguas - mieles.

El larvicompostaje es otro método especial de compostaje, en el que participan tanto larvas de moscas como los microorganismos presentes en el sustrato. La mosca soldado negro *Hermetia illucens* (Giraldo et al., 2019) es un insecto perteneciente a la familia Stratiomyidae, orden Diptera, el cual es originario de América. Los adultos viven, se aparean y ponen sus huevos en grietas y hendiduras cerca del hábitat de las larvas. La mosca soldado negro no es reconocida como una plaga debido a que el adulto no se siente atraído por las viviendas humanas o alimentos. Los adultos no necesitan alimentarse, dado que pueden sobrevivir con la gran cantidad de tejido adiposo almacenado en la etapa larval. La larva de la mosca soldado negro es una consumidora voraz de la materia orgánica en descomposición como residuos de cocina, residuos agroindustriales (como la pulpa de café) y estiércol animal, entre otros (Newton et al., 2005). Estas larvas son más resistentes que las lombrices a diversas sustancias tales como el amoníaco y el alcohol, soportan valores de pH en el rango

ácido y las temperaturas que se generan durante el proceso de compostaje.

El larvicompostaje de la pulpa de café mediante las larvas de la mosca *Hermetia illucens* (Figura 13) tiene como propósito la obtención de dos productos de interés: abono orgánico para utilizarlo en los diferentes cultivos de la finca cafetera y proteína de calidad para ser utilizada en la alimentación animal (aves y peces, entre otros), disminuyendo los costos de producción en los programas de seguridad alimentaria, al reemplazar parte de los concentrados para animales, cuyo precio es significativo en el proceso productivo.

En Cenicafé se reportan rendimientos promedio del orden del 38,28%, en base seca, en la obtención de abono orgánico en el proceso de larvicompostaje de la pulpa de café con larvas de la mosca soldado negro, para un período de 3 meses. Estos rendimientos aumentan al 46,99 % en base seca, en la obtención de abono orgánico en el proceso de larvicompostaje de la pulpa de café mezclada con aguas - mieles del café y mediante la acción de larvas de la mosca soldado negro, para un período de 3 meses (Cenicafé, 2013).



Figura 13. Larvicultura con pulpa de café.

En la Tabla 13 se presenta una caracterización de la composición físico-química del abono obtenido por el proceso de larvicompostaje de la pulpa sola y mezclada con aguas - mieles.

Las larvas de la mosca se pueden recolectar utilizando tamices o trampas de agua y se

pueden secar para la elaboración de harina para la alimentación animal. Nguyen et al. (2015), reportados por Barragán-Fonseca et al. (2017) reportan contenidos de proteína cruda del 38,5% y contenidos de grasa de 6,63% para larvas de mosca soldado negro alimentadas con residuos vegetales.

**Tabla 13.** Caracterización físico-química del proceso de larvicompostaje de la pulpa sola y mezclada con aguas mieles.

Parámetro	Larvicompuesto de pulpa de café	Larvicompuesto de pulpa de café + aguas -mieles
Humedad (%)	73,67	78,33
pH (unidades)	8,22	7,53
Cenizas (% bs)	41,01	48,41
N (% bs)	3,77	4,05
MO (% bs)	58,99	51,59
C/N	9,08	7,39
P (% bs)	0,25	0,27
K (% bs)	6,71	5,31
Ca (% bs)	0,88	0,90
Mg (% bs)	0,27	0,23
Fe (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	876,75	858,00
Mn (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	129,78	141,12
Zn (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	14,31	37,47
Cu (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	31,82	83,22
B (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	40,82	44,12

(% bs): Porcentaje en base seca

**Para una finca que produzca 1.000 @ de cps, se generan aproximadamente 27 toneladas de pulpa fresca, de las cuales se producen, mediante el proceso de larvicompostaje, aproximadamente 3,2 toneladas de abono orgánico (en base seca) de fórmula 19 N – 3 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 34 K<sub>2</sub>O.**

## Utilización del abono orgánico obtenido de los subproductos del café.

Investigaciones desarrolladas por Valencia (1972), en Cenicafé, reportan una relación en la mezcla de pulpa descompuesta por compostaje y suelo de 1:3, como la apropiada para almácigos de café. Mestre (1973), en Cenicafé, reporta una relación óptima entre pulpa descompuesta por compostaje y suelo de 1:1, para ser utilizada como sustrato en la etapa de almácigo.

Investigaciones realizadas en Cenicafé por Uribe & Salazar (1983), demostraron la capacidad fertilizante de la pulpa de café descompuesta mediante procesos de compostaje, recomendando dosis de 6 kg de pulpa descompuesta por planta al

año, aplicada en forma superficial en café en etapa de producción, como reemplazo a la fertilización química.

Salazar (1992), en Cenicafé, encontró que la pulpa de café transformada por la lombriz roja es un buen abono para almácigos cuando se aplica en proporción 1:3 respecto al suelo.

Arcila & Farfán (2007), en Cenicafé, reportan que con la aplicación de 2,0 a 3,0 kg de lombricompostado por planta y por año, en la etapa de producción, fraccionada en dos aplicaciones (1,0 a 1,5 kg en el primer semestre del año y de 1,0 a 1,5 kg de lombricompostado en el segundo semestre), se obtienen producciones iguales que cuando se aplica al café fertilizantes químicos basados en los análisis de suelos.

**Para una finca que produzca 1.000 @ año<sup>-1</sup> de cps (aproximadamente 27 toneladas de pulpa fresca al año) pueden obtenerse mediante lombricultura, 11,5 toneladas de lombricompostado fresco al año (2,5 toneladas de lombricompostado seco), que pueden utilizarse en relación 1:3 con el suelo para llenar 11.500 bolsas de almácigo de 17 cm x 23 cm. Adicionalmente se obtienen, aproximadamente, 325 kg de biomasa de lombriz para alimentación animal.**

## • Hongos comestibles y nutraceuticos

Los hongos comestibles son aquellos que se utilizan en gastronomía, siendo los más populares los champiñones, que pertenecen al género *Agaricus* spp. entre los que se destacan *Agaricus bisporus* (también conocido como champiñón de París), *Agaricus bisporus*

variedad *brunnescens* (conocido como el champiñón portobello), *Agaricus bitorquis* y *Agaricus blazei* (conocido como el champiñón del sol), tienen sabores neutros y delicados, son bajos en calorías, ricos en fibra alimentaria y proteína (entre el 11% y 13% en base seca), y se cultivan sobre un compost preparado con residuos agrícolas, el cual es sometido a procesos de compostaje durante cerca de 20 días y luego es pasteurizado durante cerca de 8 días, para posteriormente realizar la siembra de la semilla del hongo. El cultivo

del champiñón requiere de oscuridad y su temperatura óptima de cultivo se encuentra entre los 12 y los 14°C.

Existen otros tipo de hongos comestibles que se conocen con el nombre de setas y cuyo sistema de producción es más sencillo, dado que crecen sobre una gran variedad de residuos agrícolas e incluso en algunos casos no se requieren realizar mezclas de materiales para obtener buenos rendimientos y cuyo cultivo se puede realizar bajo invernadero, entre este tipo de hongos se tienen los siguientes:

### Hongos del género *Pleurotus* spp.

Son los más fáciles y menos costosos de cultivar, sus rendimientos varían entre especies y con los diferentes sustratos y aún, utilizando las mismas especies y sustratos varían bajo diferentes condiciones de cultivo (Rajarithnam & Bano, 1991). Todas las especies de *Pleurotus* spp., se caracterizan por fructificar dentro de largos rangos de temperatura entre 5 y 27°C, y la mayoría presentan los mejores rendimientos en un rango de temperatura entre 18 y 25°C (Zadrazil, 1978).

Los hongos del género *Pleurotus* spp son considerados un alimento de gran valor nutricional debido a su alto contenido de proteína, fibra y minerales. Se caracterizan por su sabor y olor agradables a los sentidos y contenidos de proteína en el rango entre 24% y 35%, en base seca. Entre las principales especies se destacan: *Pleurotus ostreatus* (también conocido con el nombre de seta ostra y orellana), *Pleurotus pulmonarius* (ostra india, ostra italiana), *Pleurotus sajor - caju* (conocido como *Lentinus sajor - caju*) y *Pleurotus eryngii* (seta de cardo).

### Hongos del género *Lentinula* spp.

Se destaca el *Lentinus edodes*, también conocido como seta China y Shiitake. Este

hongo es considerado de "especialidad" en la gastronomía de Japón, Corea y China, su contenido de proteína varía entre el 15,5% y el 19,0%, en base seca, posee un aroma intenso y sabor carnoso y ahumado, además es fuente de potasio, zinc y polisacáridos, algunos de ellos conocidos como potenciadores del sistema inmunológico. El Shiitake ha sido reconocido en Japón y China como un alimento y una medicina por miles de años, es utilizado para tratar problemas de salud tanto en niños como en adultos. En Japón, se utiliza para tratar enfermedades del corazón, úlceras, presión sanguínea, problemas de visión, alergias, hemorroides y neuralgias, entre otras (Jones, 1995).

### Hongos del género *Ganoderma* spp.

Se destaca el *Ganoderma lucidum*, conocido como seta pipa, Reishi, Mannetake, Ling Chi, Ling Zi, hongo de la inmortalidad y políporo panacea. Sus carpóforos contienen carbohidratos (azúcares reductores y polisacáridos), aminoácidos, contenidos de proteína en el rango entre el 12% y el 14% en base seca, iones inorgánicos, esteroides, triterpenos, lípidos, alcaloides, aceites volátiles, riboflavina y ácido ascórbico, tiene aroma a madera y sabor amargo (por su contenido de terpenoides). En el mercado de Oriente tradicionalmente se vende seco, también se encuentra en forma de píldoras, cápsulas y té. Aunque este hongo es relativamente duro, puede usarse en algunos platos especialmente en sopas, o puede prepararse en infusión. Los extractos de esta seta poseen efectos antivirales, debido al germanio orgánico, también tiene propiedades hipertensivas e hipotensivas (homeostasis), dadas por un péptido-glucano. Existen dos clases principales de compuestos presentes en la seta, con actividades farmacológicas, como son los triterpenos y los polisacáridos. Los primeros, disminuyen la presión sanguínea y son benéficos como anti-inflamatorios y como antivirales. Los

polisacáridos tienen efectos estimulantes en las células sanguíneas que conllevan a la liberación de citoquinas y linfocitos, lo que explica los efectos antitumorales, hipoglucémicos e inmunopotenciadores (Hobbs, 1996).

### **El hongo *Grifola frondosa*.**

Conocido comúnmente con el nombre de Maitake es considerado un hongo doble propósito gracias a sus propiedades medicinales y a su exquisito sabor en diferentes platos. Este hongo refuerza al sistema inmune gracias a la presencia de polisacáridos complejos en su estructura, siendo el principal, el beta-D-glucano, que se absorbe bien cuando se administra por vía oral y en la actualidad se estudia para la prevención y el tratamiento del cáncer, y como tratamiento de apoyo para la infección por VIH (Kubo & Nanba, 1996; Alzate, 2007).

### **El hongo *Hypsizygus marmoreus*.**

Conocido comúnmente con el nombre de Bunashimeji es uno de hongos más populares en Japón, donde es utilizado como alimento o material saborizante de alimentos, debido a su delicioso sabor y textura. El polisacárido antitumoral  $\beta$ -(1-3)-D-glucan, aislado de *Hypsizygus marmoreus* es altamente soluble en agua, lo cual lo hace muy atractivo industrialmente. En Japón lo usan para detener el proceso de envejecimiento (Royse, 1996).

### **Sustratos para el cultivo de hongos comestibles y nutracéuticos.**

La composición química de los residuos generados en la zona cafetera y de otros residuos que se generan en Colombia en el sector agrícola (residuos de los cultivos de la caña de azúcar, arroz y algodón, entre otros) hace que estos sean apropiados en el cultivo

de hongos tropicales. La gran fortaleza que presenta la caficultura para la producción de los hongos comestibles y nutracéuticos es que los dos subproductos más abundantes generados en el cultivo, la pulpa y los tallos, con cantidades aproximadas entre 2,0 y 3,0 t ha-año<sup>-1</sup> de subproducto, pueden emplearse como componentes de los sustratos para el cultivo de este tipo de hongos, permitiendo de esta manera que los productores puedan diversificar su ingreso mediante la comercialización de los hongos o utilizarlos para su beneficio como alimento o como medicina.

Los hongos son potentes agentes biológicos que convierten los residuos orgánicos incomedibles, presentes en la naturaleza, directamente en alimentos humanos palatables. Mediante el cultivo de hongos se realiza la bioconversión de materiales agrícolas en alimentos y medicinas, solucionando de esta manera, al menos parcialmente, tres de los problemas más graves que afronta la población mundial: la escasez de alimentos, las enfermedades y la contaminación ambiental.

El cultivo de hongos sobre residuos agroindustriales representa un ejemplo de la conversión más eficiente de los residuos agrícolas en alimentos para consumo humano y presenta las siguientes ventajas:

- Los hongos son directamente comestibles y apetecidos por su textura y sabor característicos.
- El método de separación de la biomasa del sustrato, es muy fácil.
- Su eficiencia de conversión en proteína por unidad de área y unidad de tiempo es muy superior, comparado con las fuentes de proteína animal.
- El sustrato residual tiene muchas formas de aprovechamiento.
- Desempeñan un papel importante en la ecología del ciclo del carbono, en la

naturaleza, reduciendo de esta manera la acumulación de residuos orgánicos.

### Cultivo de hongos comestibles y nutraceuticos sobre pulpa de café.

En Cenicafé se investigó la utilización de la pulpa de café para el cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus* spp. El proceso de cultivo de los hongos sobre la pulpa de café incluye varias etapas: la producción de la semilla de los hongos, la adecuación del sustrato, las fases de inoculación, incubación, fructificación y el manejo cosecha y poscosecha de los hongos producidos.

En los primeros trabajos se estudió el cultivo de *Pleurotus pulmonarius* (Fr.) Qué. sobre pulpa de café proveniente de un despulpado sin agua, con el fin de valorizar este subproducto e impedir que se convirtiera en una fuente de contaminación en la zona cafetera (Figura 14). La eficiencia biológica media alcanzada en el cultivo fue de 54,40% y el rendimiento medio fue de 3,6 kg m<sup>-2</sup> de hongos frescos (Rodríguez & Zuluaga, 1994).

En investigaciones posteriores, realizados en Cenicafé, se utilizó la pulpa de café para el cultivo de otras especies de *Pleurotus* spp., encontrando valores medios de eficiencia biológica del 76,34% para el hongo *Pleurotus sajor - caju*, del 68,98% para *Pleurotus ostreatus* (Gómez, 1997) y del 48,07% para *Pleurotus florida* (Rodríguez & Gómez, 2001).

### Cultivo de hongos del género *Pleurotus* spp. sobre residuos agrícolas generados en las fincas cafeteras.

Durante los años 1998 al 2013, se determinó la factibilidad técnica y económica de cultivar otras especies de hongos del género *Pleurotus*

spp. sobre sustratos preparados con los subproductos generados durante el proceso de cultivo e industrialización del café, así como subproductos provenientes de cultivos intercalados como maíz, plátano y frijol, con el fin de evitar la contaminación ambiental, diversificar e incrementar los ingresos al productor y mejorar su dieta alimenticia.

De las investigaciones se concluyó que los hongos comestibles del género *Pleurotus* spp., por su facilidad de cultivo y por su alto contenido de proteína, pueden cultivarse en las fincas cafeteras con el objeto de utilizarse en programas de seguridad alimentaria. La mayoría de los subproductos agrícolas generados en las fincas, provenientes de los cultivos de café, plátano, maíz y frijol, entre otros, pueden utilizarse para cultivar este tipo de hongos, alcanzando eficiencias biológicas medias superiores al 50% (valor que se determinó como el límite mínimo de rentabilidad), que las hace factibles para ser explotadas económicamente y con unos contenidos de proteína entre el 28% y el 30% (Rodríguez & Jaramillo, 2005a).



Figura 14. *Pleurotus pulmonarius* cultivado en pulpa de café.

### Pasos para el cultivo de los hongos del género *Pleurotus* spp.

El primer paso es la adecuación del tamaño de partícula de los materiales que conforman el sustrato de siembra. Es recomendable que el tamaño de partícula de los materiales esté entre 0,5 y 2,0 cm, con el cual se han encontrado los mejores rendimientos de cultivo. La pulpa de café tiene un tamaño de partícula promedio entre 1 y 2 cm, que es apropiado para la conformación del sustrato y debe utilizarse fresca (con menos de 2 días de generada) o ensilada y proveniente de un despulpado y transporte sin agua. El tallo de café debe molerse para obtener un tamaño de partícula inferior a 2 cm, lo cual se logra en un desintegrador – picador. Los residuos de plátano, bagazo de caña, residuos del cultivo de maíz y granos de café de calidad inferior deben molerse a tamaños de partícula inferiores a 2 cm. La película plateada de café, cisco, pergamino o cascarilla de café y la borra tienen un tamaño adecuado de partícula, por lo que no requieren de acondicionamiento.

El siguiente paso consiste en pesar las materias primas y mezclar los materiales sobre un piso de cemento o un plástico. La mezcla se realiza con una pala hasta que el material quede homogéneo y luego se empaca en costales de fibra y se lleva a

fermentación bajo agua, durante 2 semanas. Terminado el tiempo de fermentación se retira el costal con el sustrato, se deja escurrir y se lleva al cuarto de siembra, en donde el sustrato se inocula con la semilla de *Pleurotus* spp. El material inoculado se empaca en bolsas de polietileno.

Las bolsas con el sustrato inoculado se dejan en incubación, con el fin de facilitar el crecimiento micelial del hongo sobre el sustrato. La temperatura óptima de incubación para las cepas de *Pleurotus* spp. es de 25°C. Cuando el material esté completamente colonizado por el micelio del hongo (se observa una masa compacta blanco - algodonosa) lo cual ocurre en los primeros 30 días, se inicia con la etapa de fructificación (formación de los cuerpos fructíferos) y puede realizarse en el mismo cuarto donde se realizó la incubación, siempre y cuando se disponga de las condiciones de ventilación, temperatura, humedad y luz que requiere el hongo para su crecimiento y desarrollo. Al cabo de aproximadamente 15 días se realiza la primera cosecha de los hongos y pueden obtenerse hasta tres cosechas.

En las Figuras 15 a la 20 se presenta el aspecto de los diferentes hongos del género *Pleurotus* spp. cultivados sobre subproductos



**Figura 15.** *Pleurotus ostreatus* cultivado en subproductos del café (tallos + pulpa).



**Figura 16.** *Pleurotus pulmonarius* cultivado en subproductos del café (tallos + pulpa).



**Figura 17.** *Pleurotus sajor-caju* cultivado en subproductos de café (granos + pulpa).



**Figura 18.** *Pleurotus pulmonarius* cultivado en subproductos del café (cisco + película plateada).



**Figura 19.** *Pleurotus sajor-caju* cultivado en subproductos del café (pulpa + cisco).



**Figura 20.** *Pleurotus eryngii* cultivado en subproductos de la finca cafetera (pulpa + pseudotallo de plátano).

**Tabla 14.** Análisis bromatológicos y de minerales de carpóforos de *Pleurotus* spp. cultivados en subproductos del café (Rodríguez & Jaramillo, 2005a).

Parámetro	<i>P. sajor caju</i>					<i>P. pulmonarius</i>	<i>P. ostreatus</i>
	Sustrato					Sustrato	
	ATC	PC+ATC	PC	PP+CC	PC+GCI	Pulpa de café	
Humedad (%)	91,50	91,29	86,22	92,10	89,90	92,19	90,25
Nitrógeno (% bs)	7,33	8,02	5,94	5,50	5,98	6,69	6,07
Proteína (% bs)*	32,11	35,13	26,02	24,09	26,19	29,30	26,59
Cenizas (% bs)	5,70	8,92	7,66	5,55	8,52	10,97	7,57
Fibra (% bs)	14,67	11,98	13,12	6,33	10,16	8,74	9,17
Grasa (% bs)	1,48	1,10	1,24	0,38	1,47	2,37	1,92
E.L.N (% bs)	46,04	42,87	51,96	69,48	53,66	48,62	54,75
P (% bs)	0,47	0,48	0,37	0,12	1,00	1,40	0,90
K (% bs)	1,38	2,29	2,03	2,65	3,09	4,40	2,58
Ca (% bs)	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,04	0,02
Mg (% bs)	0,19	0,19	0,10	0,13	0,14	0,20	0,13
Fe (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	81,00	214,00	44,00	177,00	79,00	340,00	98,00
Mn (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	11,00	12,00	8,00	5,00	9,00	13,00	9,00
Zn (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	120,00	147,00	125,00	38,00	82,00	166,00	85,00
Cu (mg kg <sup>-1</sup> ) (bs)	10,00	19,00	10,00	5,00	24,00	49,00	17,00

ATC: Aserrín de tallos de café; PC: Pulpa de café; PP: Película plateada de café; CC: Cisco de café; GCI: Granos de café de calidad inferior. \*Proteína calculada como  $N \times 4,38$ .

(% bs): Porcentaje en base seca

generados en las fincas cafeteras (Rodríguez & Jaramillo, 2005a; Vargas, 2013).

En la Tabla 14 se presentan los resultados del análisis bromatológico y de minerales de los hongos comestibles del género *Pleurotus* spp. cultivados sobre subproductos del café.

De acuerdo con la información condensada en la Tabla 14 pueden apreciarse los altos valores de proteína, fibra y minerales, y los bajos valores en grasas que contienen las diferentes especies de hongos del

género *Pleurotus* spp. cultivados sobre los subproductos del café, lo que aunado a su sabor y textura los constituyen en un alimento apropiado para el consumo humano, generado a partir de residuos incomedibles y con bajo valor nutricional como son los subproductos del café.

### Cultivo de hongos nutraceuticos sobre residuos agricolas generados en las fincas cafeteras.

Entre los años 1998 y 2006, en Cenicafé se desarrollaron investigaciones relacionadas

con el cultivo integral de los hongos nutraceuticos *Lentinula edodes* (Shiitake), *Ganoderma lucidum* (Reishi), *Grifola frondosa* (Maitake) e *Hypsizygus marmoreus* (Shimeji) en los subproductos más abundantes generados en el proceso de cultivo del café, con el propósito de generar alternativas atractivas para los productores que les permitieran diversificar su ingreso, en un periodo caracterizado por los bajos precios del grano en el mercado internacional.

Se evaluaron diferentes formulaciones de sustrato, conformadas con aserrín de tallo de café, borra y pulpa de café, esterilizadas con vapor. Para *L. edodes* (Figura 21) se determinó que los sustratos con una relación C/N de 40 pueden obtener unas eficiencias biológicas medias entre el 52% y el 76%, en las condiciones de la zona cafetera colombiana; el hongo *G. lucidum* (Figura 22) puede cultivarse sobre sustratos conformados con los subproductos del cultivo e industrialización del café, con relaciones C/N entre 40 y 60, con eficiencias biológicas medias en el cultivo del 7% al 13% (Rodríguez & Jaramillo, 2005b); el hongo *G. frondosa* (Figura 23) puede cultivarse en sustratos conformados con la mezcla de aserrín de tallos de café y borra con eficiencia biológica del 49,7% (Alzate, 2007); el hongo *Hypsizygus marmoreus* (Figura 24) puede cultivarse en sustratos conformados con la mezcla de aserrín de tallos de café y borra de café con eficiencias biológicas del 17,4%.

De acuerdo con la información condensada en la Tabla 15 pueden apreciarse los altos valores de proteína y minerales y los bajos valores en grasas que contienen las diferentes cepas de *Lentinula edodes* cultivadas sobre los subproductos del café, lo que aunado a su sabor y textura las constituyen en un alimento gourmet para el consumo humano; así como los altos contenidos de fibra de *Ganoderma lucidum* cultivado sobre los subproductos



**Figura 21.** *Lentinula edodes* cultivado en subproductos del café (tallos + borra).



**Figura 22.** *Ganoderma lucidum* cultivado en subproductos del café (tallos + pulpa + borra).



**Figura 23.** *Grifola frondosa* cultivado en subproductos del café (tallos + borra).



**Figura 24.** *Hypsizygus marmoreus* cultivado en subproductos del café (tallos + borra).

**Tabla 15.** Análisis bromatológico y de minerales de los hongos medicinales *Lentinula edodes* (cepas L13, L54 y L4055) y *Ganoderma lucidum* cultivados sobre subproductos del café (Rodríguez & Jaramillo, 2005b).

Parámetro	<i>Lentinula edodes</i>			<i>Ganoderma lucidum</i>
	L13	L54	L4055	
Humedad (%)	89,77	90,44	90,94	73,17
Nitrógeno (% bs)	4,03	4,06	3,65	2,95
Proteína (% bs)*	17,63	17,77	15,97	12,92
Cenizas (% bs)	5,72	6,38	6,12	2,96
Fibra (% bs)	9,09	12,41	12,06	33,06
Grasa (% bs)	1,76	1,83	1,73	1,57
E.L.N (% bs)	65,79	61,62	64,13	49,49
P (% bs)	0,80	0,97	0,80	0,63
K (% bs)	2,29	2,57	2,52	0,80
Ca (% bs)	0,06	0,06	0,06	0,19
Mg (% bs)	0,12	0,13	0,14	0,13
Fe (mg kg <sup>-1</sup> ) bs	44,00	55,00	54,00	49,00
Mn (mg kg <sup>-1</sup> ) bs	17,00	22,00	22,00	18,00
Zn (mg kg <sup>-1</sup> ) bs	125,00	126,00	132,00	187,00
Cu (mg kg <sup>-1</sup> ) bs	16,00	16,00	29,00	50,00
B (mg kg <sup>-1</sup> ) bs	5,00	7,00	5,00	4,00
pH	5,81	5,81	6,00	4,27

\*Proteína calculada como N x 4,38.

(% bs): Porcentaje en base seca

del café, que aunado a sus contenidos de triterpenos y polisacáridos lo constituyen en un nutraceutico generado a partir de residuos incomedibles y con bajo valor nutricional como son los subproductos del café.

### Aprovechamiento del sustrato residual del cultivo de hongos comestibles y nutraceuticos sobre subproductos del café.

En la Tabla 16 se presentan los resultados de los análisis bromatológicos y de minerales de los sustratos utilizados en la producción

de hongos del género *Pleurotus* spp., antes y después de su cultivo. Al comparar los análisis bromatológicos de los sustratos frescos y del sustrato residual, se observa el aumento en el contenido de proteína debido a las pérdidas de materia seca del sustrato y al micelio de *Pleurotus* spp. que queda aún presente en el sustrato residual.

La relación C/N refleja la degradación de la materia orgánica, pues al disminuir el contenido de C, la relación disminuye. Las diversas especies de *Pleurotus* spp. tienen una capacidad diferente de degradación de

**Tabla 16.** Análisis bromatológicos y de minerales de los sustratos antes (A) y después (D) del cultivo de *Pleurotus* spp. (Rodríguez & Jaramillo, 2005a.).

Parámetro	<i>P. sajor caju</i>						<i>P. pulmonarius</i>		<i>P. ostreatus</i>	
	Pulpa de café		Aserrín de tallo de café		Pulpa + aserrín de tallo de café		Pulpa de café		Pulpa de café	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
Humedad (%)	78,48	78,84	52,65	47,83	73,66	73,05	76,28	82,56	78,35	83,62
Nitrógeno (% bs)	1,83	2,18	0,55	0,77	1,15	1,36	1,14	2,58	1,61	2,71
Proteína (% bs)	11,43	13,62	3,44	4,82	7,17	8,50	7,13	16,13	10,08	16,94
Cenizas (% bs)	2,85	3,60	1,45	2,02	2,79	3,25	11,22	6,76	6,89	8,34
Fibra (% bs)	31,18	33,00	67,30	67,30	56,05	59,47	11,75	20,07	13,17	22,64
Grasa (% bs)	4,83	3,15	4,98	0,42	1,69	1,03	1,71	3,68	2,39	1,58
E.L.N (% bs)	49,71	46,63	22,83	25,44	32,30	30,23	68,19	53,36	67,48	50,50
P (% bs)	0,04	0,04	0,01	0,01	0,03	0,01	0,08	0,06	0,12	0,08
K (% bs)	0,42	0,22	0,04	0,04	0,20	0,16	3,49	1,66	2,69	2,24
Ca (% bs)	0,09	0,46	0,36	0,46	0,95	0,48	0,40	0,86	0,37	1,01
Mg (% bs)	0,06	0,11	0,02	0,02	0,03	0,03	0,08	0,18	0,11	0,17
Fe (mg kg <sup>-1</sup> bs)	597,00	265,00	921,00	80,00	161,00	130,00	Nd	Nd	318,00	880,00
Mn (mg kg <sup>-1</sup> bs)	31,00	52,00	25,00	17,00	20,00	21,00	Nd	Nd	37,00	101,00
Zn (mg kg <sup>-1</sup> bs)	28,00	38,00	9,00	9,00	34,00	27,00	Nd	Nd	15,00	39,00
Cu (mg kg <sup>-1</sup> bs)	12,00	19,00	5,00	4,00	10,00	7,00	Nd	Nd	13,00	29,00
C/N	34	28	113	81	54	58	49	23	37	21

(% bs): Porcentaje en base seca

Nd: No determinado

los sustratos que está ligada a su naturaleza enzimática. La relación C/N presente en el sustrato residual le abre la posibilidad de poderlo reciclar para el cultivo del *Agaricus bisporus* (champiñón de París) y también para el cultivo de los hongos *Lentinula edodes* y *Ganoderma lucidum*.

El incremento en el contenido de proteína del sustrato residual aunado a la degradación de la lignina que efectúan las especies de *Pleurotus* spp., aumentando la digestibilidad del residuo, abren la posibilidad de poderlo utilizar en la alimentación animal.

Lozano (1990) reporta que el sustrato residual de la producción de *Pleurotus ostreatus* sobre pulpa de café, se suministró a vacas lactantes (mezclado con pasto de corte), en una cantidad diaria de 10 kg de residuo por vaca y que después de 3 meses no se observaron síntomas adversos en las vacas alimentadas con el residuo. Se registró un incremento promedio de leche del 12%, respecto a la producción obtenida antes del tratamiento. Herrera y Saldaña (1991) expresan que el

sustrato residual del cultivo de los hongos puede ser utilizado en la alimentación de rumiantes debido a sus propiedades probióticas, que ayudan a la asimilación de los alimentos. Martínez (1991), en México, reporta que el sustrato residual del cultivo de hongos comestibles se transforma mediante compostaje en abono orgánico, para ser utilizado en las fincas cafeteras.

El sustrato residual del cultivo de los hongos del género *Pleurotus* spp. (Figura 25) también puede utilizarse para la construcción de biocamas, las cuales son un sistema constituido por una matriz biológicamente activa (material lignocelulósico + material parcialmente descompuesto + suelo) que recolecta, retiene y degrada ingredientes activos de los agroquímicos y antibióticos (Castillo et al., 2008), dado que el micelio de *Pleurotus* spp. presente en el sustrato residual tiene la capacidad de degradar ingredientes activos de los agroquímicos, porque produce enzimas como las peroxidasa y lacasa, que tienen una amplia especificidad para la degradación de plaguicidas.

En Cenicafé, el sustrato residual del cultivo de los hongos del género *Pleurotus* spp. se transformó en abono orgánico mediante la utilización de la lombriz roja. El sustrato residual del cultivo cuando se utilizaron mezclas con pulpa de café, osciló entre el 38% y el 48% de la materia seca inicial. Los sustratos residuales se sometieron al proceso de lombricompostaje, alcanzando porcentajes promedios de conversión en lombricompostado, en materia seca, del 50,5% y una producción media de biomasa de lombriz del 0,5% (Rodríguez & Jaramillo, 2005a).

En la Tabla 17 se condensan los resultados de los análisis bromatológicos y de minerales de los sustratos residuales del cultivo de *Lentinula edodes*.



**Figura 25.** Sustrato residual del cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus* spp.

**Tabla 17.** Análisis bromatológico y de minerales de los bloques residuales del cultivo de *Lentinula edodes* (cepas L13, L54, L4055). Sobre subproductos del café (Rodríguez & Jaramillo, 2005.b).

Parámetro	<i>Lentinula edodes</i>		
	L13	L54	L4055
Humedad (%)	9,90	10,73	26,93
Nitrógeno (% bs)	2,14	2,16	2,13
Proteína (% bs)*	13,37	13,52	13,32
Cenizas (% bs)	7,67	7,26	7,48
Fibra (% bs)	26,68	33,76	27,95
Grasa (% bs)	1,09	1,11	0,52
E.L.N (% bs)	51,20	44,35	50,73
P (% bs)	0,22	0,21	0,21
K (% bs)	7,46	0,17	0,10
Ca (% bs)	2,08	1,86	2,14
Mg (% bs)	0,15	0,17	0,15
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	705,00	637,00	703,00
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	60,00	68,00	60,00
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	79,00	79,00	89,00
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	48,00	47,00	47,00
B (mg kg <sup>-1</sup> )	13,00	9,00	17,00
pH	4,10	4,55	4,27,00
C/N inicial	40	40	40
C/N final	25	25	25

(% bs): Porcentaje en base seca

El cultivo de las diferentes cepas de *L. edodes* sobre una misma formulación tuvo un efecto similar en el sustrato residual al evaluar los contenidos de proteínas y cenizas. En promedio, la relación C/N de los sustratos residuales obtenidos a partir de las formulaciones con una relación C/N de 40, fue finalmente de 25, equivalente a un 62,5% de la relación inicial. De acuerdo con la caracterización condensada en la Tabla 17 y teniendo en cuenta el alto contenido de nitrógeno presente en el sustrato residual, éste podría reciclarse, combinándolos con aserrín de tallo de café, para alcanzar relaciones C/N en el rango entre 40 y 60, y utilizarlos para el

cultivo de hongos del género *Pleurotus* spp. y *Ganoderma lucidum*.

Otra alternativa de aprovechamiento del sustrato residual del cultivo de *Lentinula edodes* la producción de abono orgánico mediante lombricultura, con la cual se generan dos productos: abono orgánico y biomasa de lombrices. El balance de materia para el cultivo de las diferentes cepas de *L. edodes* sobre las diversas formulaciones productivas mostró pérdidas medias en materia seca del 45%, es decir, que el sustrato residual en materia seca representó el 55%.

El lombricompuesto obtenido del sustrato residual de *L. edodes* presentó una humedad media del 69% y un pH de 6,7. Los rendimientos del proceso de lombricultivo fueron del 67,7% en peso seco y por cada kilogramo de sustrato de siembra utilizado para el cultivo de hongos medicinales se obtuvieron 400 gramos de lombricompuesto húmedo (Rodríguez & Jaramillo, 2005b).

### Concepto de bioeconomía circular aplicado en la producción de hongos comestibles y nutracéuticos en subproductos del café.

Los subproductos del proceso de beneficio e industrialización del café pueden utilizarse para la producción de alimentos (hongos comestibles) y de productos nutracéuticos

**Para una finca que produzca 1.000 @ año<sup>-1</sup> de cps (aproximadamente 27 t año<sup>-1</sup> de pulpa fresca) pueden producirse 2,7 t de hongos frescos (entre comestibles y medicinales) y el aprovechamiento del sustrato residual mediante lombricultura permite obtener, aproximadamente 4 t año<sup>-1</sup> de lombricompuesto fresco que se puede utilizar en relación 1:3 con el suelo para llenar 4.000 bolsas de almácigo, de 17 cm x 23 cm, y se obtienen aproximadamente, 122 kg de biomasa de lombriz para ser utilizada en la alimentación animal.**

(hongos medicinales), y el residuo del proceso de cultivo de los hongos puede aprovecharse para la producción de abono orgánico mediante el proceso de lombricultura, generando biomasa de lombriz que puede utilizarse para la alimentación animal.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las investigaciones de Cenicafé, se puede calcular que, por cada tonelada de sustrato fresco, que involucre pulpa de café en un 50% o más, podrían obtenerse, en promedio, 100 kg de hongos frescos, 4,5 kg de lombriz roja y 150 kg de lombricompuesto húmedo, por ciclo de cultivo de 3 meses.

## • Ensilaje

La utilización de la pulpa de café como sustrato para el cultivo de hongos comestibles y nutracéuticos y para la producción de abonos orgánicos la convierten en una materia prima fundamental en las fincas cafeteras, dado que contribuye al incremento de la producción de alimentos tanto para consumo humano como para consumo animal y a la elaboración de fertilizantes orgánicos, con su respectiva aplicación en programas de agricultura orgánica, generando impactos positivos en las áreas ambiental y económica de la producción agrícola. Sin embargo, su producción estacional y su alto contenido de humedad (cercano al 80%) se constituyen en barreras para su aprovechamiento continuo. Para mantener en el tiempo el establecimiento de sistemas de producción de abono orgánico y hongos comestibles y nutracéuticos se requiere una disponibilidad permanente de este subproducto durante todo el año.

El ensilaje es un proceso que ofrece grandes perspectivas de ser aplicado exitosamente para almacenar y conservar la pulpa de café para su posterior utilización. Consiste en la preservación de los materiales vegetales en su

estado fresco, por medio de fermentaciones parciales. La fermentación es producida por bacterias en ausencia de aire, que actúan principalmente sobre los carbohidratos solubles que contienen las células vegetales. Durante el proceso de fermentación se producen ácidos, principalmente ácido láctico, que disminuye el pH del material ensilado, a niveles que impiden el desarrollo de nuevas bacterias (Rodríguez, 2003).

Teniendo en cuenta la alta disponibilidad de pulpa de café en los meses de la cosecha principal y de mitaca, el ensilaje se constituye en una herramienta eficaz para su almacenamiento y posterior utilización, siendo un proceso que puede ser aplicado con relativa facilidad por los caficultores.

Un buen proceso de ensilado se caracteriza por la activa producción de ácidos carboxílicos volátiles y no volátiles, por las bacterias anaeróbicas, que utilizan carbohidratos solubles como principal sustrato químico. La dinámica del proceso tiene una duración aproximada de 25 días y en ella se reconocen dos fases: la fase de respiración, que es aeróbica, tiene una duración aproximada de 12 horas y concluye al agotarse el oxígeno atrapado en la masa del material ensilado; por eso, es muy importante la compactación del material para eliminar de esta manera la máxima cantidad de aire y así garantizar una fase de respiración corta. La fase de fermentación, donde inicialmente proliferan bacterias productoras de ácido acético y butírico, y posteriormente se establecen bacterias productoras de ácido láctico, con una duración aproximada de 3 días, dando origen a una fase de larga duración (20 días), en la que se producen grandes cantidades de ácido láctico (Rodríguez, 2003).

Se reporta que el contenido de carbohidratos solubles (azúcares reductores) debe ser del 13% al 16% de la materia seca en el material a ensilar. Contenidos inferiores no garantizan una producción de ácido láctico suficiente, por lo cual el valor final del pH del proceso no

sería adecuado. Esto trae como consecuencia una menor inhibición de la actividad de las bacterias butirogénicas y, por lo tanto, fermentaciones de tipo acética y butírica (Rodríguez, 2003).

La pulpa de café fresca tiene unos contenidos de azúcares reductores entre el 12,40% y el 20,58% (bs) (Tabla 2) que permiten que pueda ser ensilada sin la necesidad de adicionar melaza para su conservación, contribuyendo a la economía en el proceso de ensilaje. Para conservar el contenido de azúcares reductores en la pulpa de café, esta debe provenir de un despulpado sin agua y no debe tener más de 2 días de obtenida, para limitar las pérdidas de azúcares reductores (por el proceso de fermentación), lo que generaría un producto ensilado de mala calidad.

La pulpa puede ensilarse en silos tipo fosa (excavaciones en tierra impermeabilizadas) o tipo trinchera (infraestructuras construidas en cemento) (Figura 26) y compactarse a razón de 1,0 tonelada de pulpa por metro cúbico de silo, el cual debe tener en su fondo una inclinación del 1,0% hacia un canal central de 10 cm de ancho y 1,0% de pendiente, con el fin de evacuar del silo los lixiviados generados durante el proceso, para evitar que se acumulen y deterioren el material ensilado.

En Cenicafé se evaluó el proceso de ensilaje con el fin de conservar la pulpa, de forma que estuviera disponible para ser utilizada como materia prima para la producción de abonos orgánicos y hongos comestibles y nutracéuticos, durante todo el año. En las investigaciones realizadas se conservó la pulpa de café en silos – fosa hasta por períodos de 4 años y luego se utilizó para la producción de hongos comestibles del género *Pleurotus* spp. y para la producción de abono orgánico por lombricultura. El material ensilado presentó unas características físicas (olor, color, forma, estructura) similares al material fresco (Figura 26). En la Tabla 18 se presentan los resultados de la caracterización



**Figura 26.** Pulpa de café ensilada en silos tipo trinchera y aspecto del material ensilado.

**Tabla 18.** Análisis bromatológico y de minerales de la pulpa de café antes y después del proceso de ensilaje (Rodríguez, 2003).

Parámetro	Pulpa fresca	Pulpa ensilada
Humedad (%)	80,16	70,65
Cenizas (% bs)	6,23	6,75
Grasas (% bs)	2,50	2,75
Nitrógeno (% bs)	1,89	2,30
Proteína (% bs)	11,81	14,38
Fibra (% bs)	13,28	23,55
E.L.N (% bs)	66,18	52,57
P (% bs)	0,11	0,08
K (% bs)	2,44	1,90
Ca (% bs)	0,40	0,70
Mg (% bs)	0,10	0,14
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	210,00	770,00
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	68,00	101,00
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	18,00	12,00
B (mg kg <sup>-1</sup> )	22,00	39,00
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	19,00	27,00
pH	3,76	4,24

(% bs): Porcentaje en base seca

físico-química realizada a la pulpa antes y después del proceso de ensilaje.

Las pérdidas durante el proceso de ensilaje fueron del orden del 23,5% en base húmeda y del 22,5% en base seca (Rodríguez, 2003).

En el cultivo de *Pleurotus ostreatus* sobre pulpa ensilada (Figura 27) la eficiencia biológica media alcanzada fue del 72,53%, muy similar a la obtenida cuando se utilizó como sustrato pulpa de café fresca (68,98%), y en el cultivo de *Pleurotus sajor-caju* sobre pulpa ensilada (Figura 28) la eficiencia biológica media alcanzada fue del 82,15% muy similar a la obtenida cuando se utilizó como sustrato pulpa de café fresca (76,34%).

En la producción de abono orgánico a partir de pulpa de café ensilada y el proceso de lombricultura se encontró una capacidad de proceso por parte de la lombriz de 0,85 kg m<sup>2</sup>-d<sup>-1</sup> de pulpa ensilada y una producción de lombricompost húmedo de 0,38 kg m<sup>2</sup>-d<sup>-1</sup>. El rendimiento del proceso de lombricultura fue del 45% en base seca, superior al encontrado con la pulpa fresca que fue del 42% (Rodríguez, 2003).



**Figura 27.** *Pleurotus ostreatus* cultivado en pulpa de café ensilada.



**Figura 28.** *Pleurotus sajor-caju* cultivado en pulpa de café ensilada.

**El proceso de ensilaje permite almacenar y conservar en buen estado la pulpa de café de forma que pueda ser utilizada durante todo el año para la producción de hongos comestibles del género *Pleurotus* spp. y para la producción de abonos orgánicos.**

## • Pectinas

La pectina es un polisacárido complejo de alto peso molecular, sólido, dispersable en agua para formar un hidrosol viscoso, su composición varía con la fuente y las condiciones usadas en su obtención. El ácido D-galacturónico es siempre su principal componente, pero también están presentes cantidades variables de D-xilosa, D-galactosa, L-arabinosa y L-ramnosa. La pectina es utilizada en las industrias alimenticia, cosmética y farmacéutica por sus propiedades gelatinizantes, espesantes y estabilizantes. Entre las sustancias capaces de formar geles se encuentran: el almidón, la gelatina y las pectinas. La gelatina, obtenida de subproductos animales, solamente forma geles a temperaturas bajas. El almidón actúa muy bien a condiciones normales, pero tiene tendencia a perder líquido cuando el alimento se congela y se descongela. Las pectinas forman geles en medio ácido en presencia de altas cantidades de azúcar, situación que ocurre en las mermeladas, la cual es una de sus aplicaciones fundamentales. En el proceso de conservación de alimentos por refrigeración y congelación, las pectinas dan firmeza y consistencia a muchos preparados. Así mismo, se utilizan en la elaboración de caramelos y en la fabricación de pan para dar mayor consistencia a la masa (Acevedo & Rueda, 1986).

En la industria médico-farmacéutica se utiliza como absorbente intestinal. Se ha utilizado en la preparación de vendajes, pues facilita la cicatrización de las heridas y para el tratamiento de úlceras de la piel. En la industria cosmética, la pectina es empleada en las formulaciones de pastas dentales, ungüentos, aceites, cremas, desodorantes, tónicos capilares, lociones de baño y champú, por sus propiedades suavizantes y estabilizantes.

Las materias vegetales más usadas comercialmente para la elaboración de pectina son la manzana y las frutas cítricas como la naranja, toronja y limón. El contenido de las sustancias pécticas en los frutos está entre 0,5% a 1,0% del peso de la fruta fresca; en las cáscaras de los frutos cítricos se reportan valores entre el 3,0% y el 4,0% en peso fresco. El contenido de pectina en base húmeda de algunos frutos es: mora de Castilla 1,4%, en la papaya varía entre 2,05% y 3,39%, en el mango 1,85%, en la guayaba 0,99% (Corona et al., 1996).

En Cenicafé, Calle (1958) reportó contenidos de pectina del 5,0% en base seca en la pulpa y el mucilago de café (1,0% en base húmeda) García et al. (1987), en Guatemala, reportan rendimientos de obtención de pectinas del 0,26% en base húmeda y 1,22% en base seca, en el fruto de café. Rodríguez, en Cenicafé, realizó la investigación para la obtención de pectinas comerciales de la pulpa y el mucilago de café (Cenicafé, 1999).

En las Tablas 19 y 20 se presentan las caracterizaciones de la pulpa y el mucilago utilizados como materias primas para la obtención de pectinas comerciales. De acuerdo con los datos condensados en la Tabla 19, se encontró que el contenido promedio de pectinas en la pulpa de café fue del 1,81% en base húmeda (8,00% bs) y de los datos condensados en la Tabla 20, se encontró que el contenido promedio de pectinas en el mucilago de café fue del 0,85% en base húmeda (10,95% bs). Sumando los contenidos de pectina de la pulpa y el mucilago se obtiene un valor de 9,14 g kg<sup>-1</sup> de café cereza, equivalente a un contenido del 0,91% en base húmeda y del 3,04% en base seca, respecto al fruto. Los contenidos de pectinas en los subproductos del café están dentro del rango de valores de los productos que se utilizan como materia prima para la obtención de pectinas comerciales, por lo que se constituyen en fuentes potenciales para su producción.

**Tabla 19.** Caracterización de la pulpa de café utilizada como materia prima para la producción de pectinas comerciales.

Muestra	pH	Humedad (%)	Grados Brix	Azúcares reductores (% bs)	Contenido pectina (% bs)
1	4,46	76,40	3,80	17,08	6,86
2	4,34	77,05	3,90	16,98	8,64
3	4,58	80,40	2,70	12,24	8,20
4	4,29	77,60	3,70	17,51	12,73
5	4,45	74,60	4,70	24,71	11,42
6	4,51	75,90	4,30	18,18	5,36
7	4,50	78,90	3,60	19,26	10,59
8	4,56	83,75	2,30	17,62	6,73
9	4,06	80,03	2,80	13,59	8,92
10	4,48	77,69	3,00	18,83	7,69
11	4,31	77,30	3,40	17,76	8,12
12	4,57	76,20	3,30	12,95	4,14
13	4,48	75,40	3,50	14,05	9,48
14	4,36	76,20	3,90	16,22	6,20
15	4,45	75,90	4,00	19,35	5,57
16	4,40	75,40	4,50	20,58	7,42
Promedio	4,43	77,42	3,59	17,31	8,00

(% bs): Porcentaje en base seca

**Tabla 20.** Caracterización del mucilago de café utilizado como materia prima para la producción de pectinas comerciales.

Muestra	pH	Humedad (%)	Grados Brix	Azúcares reductores (% bs)	Contenido pectina (% bs)
1	4,13	90,80	10,90	70,11	6,22
2	4,65	91,07	8,40	63,94	10,95
3	4,66	93,24	9,20	84,47	11,19
4	4,86	91,56	8,80	69,67	10,34
5	4,32	92,93	7,80	78,50	11,02
6	4,98	91,93	8,70	60,35	12,45
7	4,59	91,68	8,60	54,57	11,35
8	4,63	89,70	10,80	71,84	9,65
9	4,47	93,10	7,30	65,51	7,14
10	4,27	95,80	8,50	57,36	16,63
11	4,30	95,70	9,20	61,16	19,08
12	4,21	89,40	9,80	57,74	4,60
13	4,16	94,70	8,90	78,49	12,26
14	4,13	91,07	8,70	58,9	8,80
15	4,32	91,50	9,40	61,88	11,72
16	4,61	91,02	9,80	50,56	11,82
Promedio	4,46	92,20	9,05	65,32	10,95

(% bs): Porcentaje en base seca

En las Tablas 21 y 22 se presentan las características del proceso de obtención de pectinas a partir de pulpa y mucílago de café en las etapas de hidrólisis, precipitación y purificación, además de los rendimientos del proceso, pureza, grado de esterificación y aplicación comercial de las pectinas obtenidas.

A partir de la investigación realizada se logró determinar que, para los tratamientos de obtención de pectina comercial a partir de la pulpa de café, los mayores rendimientos del proceso se obtuvieron cuando la pulpa se hidrolizó en medio alcalino en presencia de sulfito de sodio, tanto para la precipitación con etanol como con cloruro de aluminio.

**Tabla 21.** Características del proceso de obtención y de la calidad de la pectina obtenida a partir de 10 kg de pulpa de café fresca.

Hidrólisis	Precipitación	Purificación	Pureza Pectina Obtenida (%)	Grado Esterificación Pectina (%)	Aplicación de la pectina obtenida	Rendimientos del proceso gramos de pectina seca/10 kg de materia prima
Alcalina (150 g de Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> y 70 mL de NaOH 18,83N)	120 mL L <sup>-1</sup> de etanol y HCl 4N hasta pH de 3,20	90 mL L <sup>-1</sup> etanol 5 mL L <sup>-1</sup> de sulfato de amonio 1M 250 mL L <sup>-1</sup> de Timsen al 2%	78,79	32,78	Industria farmacéutica	54,00
Alcalina (150 g de Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> y 70 mL de NaOH 18,83N)	HCl 4N hasta pH de 3,50 y AlCl <sub>3</sub> 1M hasta pH de 3,20	45 mL L <sup>-1</sup> de isopropanol acidificado y amoníaco hasta pH de 4,00	73,93	27,12	Industria farmacéutica	152,93
Alcalina y polifosfatos (100 g de fosfato tribásico de sodio y 40 mL de NaOH 18,83N)	120 mL L <sup>-1</sup> de etanol y HCl 4N hasta pH de 3,20	90 mL L <sup>-1</sup> etanol 5 mL L <sup>-1</sup> de sulfato de amonio 1M 250 mL L <sup>-1</sup> de Timsen al 2%	64,44	45,73	Industria farmacéutica	30,50
Alcalina y polifosfatos (100 g de fosfato tribásico de sodio y 40 mL de NaOH 18,83N)	HCl 4N hasta pH de 3,50 y AlCl <sub>3</sub> 1M hasta pH de 3,20	45 mL L <sup>-1</sup> de isopropanol acidificado y amoníaco hasta pH de 4,00	57,75	39,32	Industria farmacéutica	33,80
Ácida (HCl hasta pH 3,20)	120 mL L <sup>-1</sup> de etanol y HCl 4N hasta pH de 3,20	90 mL L <sup>-1</sup> etanol 5 mL L <sup>-1</sup> de sulfato de amonio 1M 250 mL L <sup>-1</sup> de Timsen al 2%	35,78	77,65	Industria de Alimentos	20,50
Ácida (HCl hasta pH 3,20)	HCl 4N hasta pH de 3,50 y AlCl <sub>3</sub> 1M hasta pH de 3,20	45 mL L <sup>-1</sup> de isopropanol acidificado y amoníaco hasta pH de 4,00	33,73	64,22	Industria de Alimentos	27,78

Continuación...

...continúa

Hidrólisis	Precipitación	Purificación	Pureza Pectina Obtenida (%)	Grado Esterificación Pectina (%)	Aplicación de la pectina obtenida	Rendimientos del proceso gramos de pectina seca/10 kg de materia prima
Ácida y polifosfatos (100 g de hexametáfosfato de sodio y HCl hasta pH 3,20)	120 mL L <sup>-1</sup> de etanol y HCl 4N hasta pH de 3,20	90 mL L <sup>-1</sup> etanol 5 mL L <sup>-1</sup> de sulfato de amonio 1M 250 mL L <sup>-1</sup> de Timsen al 2%	61,01	69,45	Industria de Alimentos	18,20
Ácida y polifosfatos (100 g de hexametáfosfato de sodio y HCl hasta pH 3,20)	HCl 4N hasta pH de 3,50 y AlCl <sub>3</sub> 1M hasta pH de 3,20	45 mL L <sup>-1</sup> de isopropanol acidificado y amoniaco hasta pH de 4,00	50,09	49,56	Industria farmacéutica	19,40

El mejor tratamiento en la precipitación de pectinas de pulpa de café con etanol fue la hidrólisis alcalina combinada con la adición de sulfito de sodio, en el cual se obtuvieron 54,00 g de pectina con una pureza del 78,79% y con un grado de esterificación del 32,78%. La cantidad de pectina pura obtenida en este tratamiento fue de 42,55 g por cada 10 kg de pulpa fresca (1,88% bs). El mejor tratamiento en la precipitación de pectinas de pulpa de café con cloruro de aluminio fue la hidrólisis alcalina combinada con adición de sulfito de sodio, en el cual se obtuvieron 152,93 g de pectina con una pureza del 73,93% y con un grado de esterificación del 27,12%. La cantidad de pectina pura obtenida en este tratamiento fue de 113,06 g por cada 10 kg de pulpa fresca (5,01% bs).

El mejor tratamiento en la precipitación de pectinas de mucílago de café con etanol fueron la hidrólisis (alcalina y ácida) combinada con la adición de polifosfatos, con un promedio de 30,37 g de pectina pura por cada 10 kg de mucílago fresco (3,89% bs). El mejor tratamiento en la precipitación de pectinas de mucílago de café con cloruro de aluminio fue la hidrólisis alcalina combinada con la adición de sulfito de sodio, con 153,85 g de pectina con una pureza del 49,94% y con un grado de esterificación del 52,76%. La cantidad de pectina pura obtenida en este

tratamiento fue de 76,83 g por cada 10 kg de mucílago fresco (9,85% bs).

Al comparar los rendimientos en base seca (g de pectina pura seca/g de materia prima seca por 100) de los mejores tratamientos, se observa que fueron superiores cuando se utilizó como materia prima el mucílago de café y cuando son expresados en base húmeda (g de pectina pura seca/g de materia prima fresca por 100) se observa que fueron superiores cuando se utilizó como materia prima la pulpa de café. Los rendimientos del proceso de producción de pectinas fueron superiores cuando la precipitación de la pectina se realizó utilizando cloruro de aluminio comparada con la precipitación con etanol.

Sumando las pectinas obtenidas de la pulpa y el mucílago de café, en los mejores tratamientos precipitados con etanol, se encuentra que pueden obtenerse 2,31 g de pectina pura seca de los subproductos provenientes de un kilogramo de frutos de café y sumando las pectinas obtenidas de los mejores tratamientos precipitados con cloruro de aluminio, se encuentra que pueden obtenerse 6,07 g de pectina pura seca de los subproductos provenientes de un kilogramo de frutos de café.

**Tabla 22.** Características del proceso de obtención y de la calidad de la pectina obtenida a partir de 10 kg de mucilago de café fresco.

Hidrólisis	Precipitación	Purificación	Pureza Pectina Obtenida (%)	Grado Esterificación Pectina (%)	Aplicación de la pectina obtenida	Rendimientos del proceso gramos de pectina seca/10 kg de materia prima
Alcalina (75 g de Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> y 35 mL de NaOH 18,83N)	120 mL L <sup>-1</sup> de etanol y HCl 4N hasta pH de 3,20	90 mL L <sup>-1</sup> etanol 5 mL L <sup>-1</sup> de sulfato de amonio 1M 250 mL L <sup>-1</sup> de Timsen al 2%	47,84	58,74	Industria de Alimentos	55,20
Alcalina (75 g de Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> y 35 mL de NaOH 18,83N)	HCl 4N hasta pH de 3,50 y AlCl <sub>3</sub> 1M hasta pH de 3,20	45 mL L <sup>-1</sup> de isopropanol acidificado y amoniaco hasta pH de 4,00	49,94	52,76	Industria de Alimentos	153,85
Alcalina y polifosfatos (50 g de fosfato tribásico de sodio y 20 mL de NaOH 18,83N)	120 mL L <sup>-1</sup> de etanol y HCl 4N hasta pH de 3,20	90 mL L <sup>-1</sup> etanol 5 mL L <sup>-1</sup> de sulfato de amonio 1M 250 mL L <sup>-1</sup> de Timsen al 2%	37,54	46,27	Industria farmacéutica	80,60
Alcalina y polifosfatos (50 g de fosfato tribásico de sodio y 20 mL de NaOH 18,83N)	HCl 4N hasta pH de 3,50 y AlCl <sub>3</sub> 1M hasta pH de 3,20	45 mL L <sup>-1</sup> de isopropanol acidificado y amoniaco hasta pH de 4,00	56,25	33,47	Industria farmacéutica	108,60
Ácida (HCl hasta pH 3,20)	120 mL L <sup>-1</sup> de etanol y HCl 4N hasta pH de 3,20	90 mL L <sup>-1</sup> etanol 5 mL L <sup>-1</sup> de sulfato de amonio 1M 250 mL L <sup>-1</sup> de Timsen al 2%	33,88	63,97	Industria de Alimentos	74,20
Ácida (HCl hasta pH 3,20)	HCl 4N hasta pH de 3,50 y AlCl <sub>3</sub> 1M hasta pH de 3,20	45 mL L <sup>-1</sup> de isopropanol acidificado y amoniaco hasta pH de 4,00	31,51	66,72	Industria de Alimentos	95,88
Ácida y polifosfatos (50 g de hexametáfosfato de sodio y HCl hasta pH 3,20)	120 mL L <sup>-1</sup> de etanol y HCl 4N hasta pH de 3,20	90 mL L <sup>-1</sup> etanol 5 mL L <sup>-1</sup> de sulfato de amonio 1M 250 mL L <sup>-1</sup> de Timsen al 2%	35,64	68,90	Industria de Alimentos	85,50
Ácida y polifosfatos (50 g de hexametáfosfato de sodio y HCl hasta pH 3,20)	HCl 4N hasta pH de 3,50 y AlCl <sub>3</sub> 1M hasta pH de 3,20	45 mL L <sup>-1</sup> de isopropanol acidificado y amoniaco hasta pH de 4,00	29,43	71,35	Industria de Alimentos	136,25

En la Figuras 29 a 31 se presentan detalles de las diferentes etapas del proceso de obtención de pectinas comerciales a partir de la pulpa y el mucilago de café.



**Figura 29.** Detalle de la etapa de precipitación de pectinas de los subproductos del café.



**Figura 30.** Detalle de la etapa de purificación de pectinas de los subproductos del café.



**Figura 31.** Detalle de la pectina seca obtenida de los subproductos del café.

### Aprovechamiento de la pulpa residual del proceso de obtención de pectinas.

La pulpa residual del proceso de obtención de la pectina representó, en promedio, el 47,41% en base húmeda y el 50,00% en base seca de la pulpa de café inicial (Tabla 23), y se utilizó para la producción del hongo comestible *Pleurotus ostreatus* y para la producción de abono orgánico a partir de lombricultura.

En la Tabla 24 se presentan los resultados de la eficiencia biológica del cultivo del hongo *Pleurotus ostreatus* en la pulpa de café residual del proceso de obtención de pectinas, en el cual se alcanzó una eficiencia biológica media del 55,91%.

En la Tabla 25 se presentan los resultados de la producción de lombricompost a partir de la pulpa de café residual del proceso de

obtención de pectinas, en el cual se alcanzó un rendimiento medio en el proceso del 41,01% en base húmeda y del 55,56% en base seca.

En la Tabla 26 se presentan los resultados del incremento de lombrices y tiempo de proceso de la producción de abono orgánico mediante lombricultura. En promedio, el incremento de lombrices en la pulpa residual del proceso de producción de pectinas fue del 23,93% para un tiempo promedio de transformación de la pulpa en abono orgánico de 37 días.

### Concepto de bioeconomía circular aplicado en la producción de pectinas de la pulpa y el mucílago de café.

La pulpa y el mucílago de café generados en el proceso de beneficio del café pueden utilizarse para la producción de pectinas

**Tabla 23.** Pérdidas presentadas en el proceso de obtención de pectinas a partir de pulpa de café.

Muestra	Peso pulpa fresca (kg)	Humedad pulpa fresca (%)	Peso seco pulpa fresca (kg)	Peso pulpa residual proceso (kg)	Humedad pulpa residual proceso (%)	Peso seco pulpa residual Proceso (kg)	Pérdidas del proceso % bh	Pérdidas del proceso % bs
1	10,00	76,40	2,36	4,32	80,93	0,82	56,77	65,07
2	10,00	77,05	2,30	4,45	77,16	1,02	55,47	55,68
3	10,00	80,40	1,96	4,12	75,97	0,99	58,76	49,44
4	10,00	77,60	2,24	4,68	74,19	1,21	53,22	46,10
5	10,00	74,60	2,54	4,48	69,97	1,35	55,19	47,02
6	10,00	75,90	2,41	4,87	78,06	1,07	51,31	55,67
7	10,00	78,90	2,11	4,57	74,59	1,16	54,30	44,97
8	10,00	83,75	1,63	4,35	76,84	1,01	56,54	38,06
9	10,00	80,03	2,00	5,18	79,12	1,08	48,20	45,84
10	10,00	77,69	2,23	5,04	78,77	1,07	49,61	52,05
11	10,00	77,30	2,27	4,77	78,72	1,02	52,30	55,28
12	10,00	76,20	2,38	4,73	78,81	1,00	52,71	57,90
13	10,00	75,40	2,46	4,88	78,51	1,05	51,24	57,40
14	10,00	76,20	2,38	4,80	72,92	1,30	52,04	45,43
15	10,00	75,90	2,41	5,23	71,06	1,51	47,71	37,21
16	10,00	75,40	2,46	5,39	75,72	1,31	46,15	46,85
Promedio	10,00	77,42	2,26	4,74	76,33	1,12	52,59	50,00

(% bs): Porcentaje en base seca (% bh): Porcentaje en base húmeda

comerciales y el residuo del proceso puede aprovecharse para la producción de hongos comestibles y de abono orgánico, mediante el proceso de lombricultura, generando biomasa de lombriz que puede utilizarse para la alimentación animal.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las investigaciones de Cenicafé, por cada tonelada de pulpa de café fresca pueden producirse 11,3 kg de pectina pura comercial y por cada tonelada de mucílago de café pueden producirse 7,7 kg de pectina pura comercial, lo que representa un valor de 6,1 kg de pectina pura comercial a partir de la pulpa y el mucílago contenidos en una tonelada de frutos de café. El sustrato residual de la producción de pectinas

representó, en base húmeda, el 47,41% de la pulpa fresca y permitió la producción de hongos comestibles con eficiencias biológicas medias del 55,91% y la producción de abono orgánico con rendimientos medios del proceso del 41,01% en base húmeda, en 37 días, e incremento de lombrices del 23,93%.

## • Aceites

La Norma Técnica Colombiana 3272 define a los aceites y grasas comestibles como aquellos productos alimenticios constituidos básicamente por glicéridos de ácidos grasos principalmente triglicéridos, los cuales son de origen vegetal, animal o sus mezclas. Pueden

### **Para una finca que produzca 1.000 @ año<sup>-1</sup> de cps (aproximadamente 27 t año<sup>-1</sup> de pulpa fresca y 9 t año<sup>-1</sup> de mucílago) pueden obtenerse:**

- **370 kg año<sup>-1</sup> de pectinas** (300 kg a partir de la pulpa y 70 kg a partir del mucílago)
- **5,25 t año<sup>-1</sup> de lombricompost** fresco por el aprovechamiento del sustrato residual mediante lombricultura, que permiten producir **148 kg año<sup>-1</sup> de biomasa de lombriz** para ser utilizada en la alimentación animal. El lombricompost puede utilizarse en relación 1:3 con el suelo para llenar 5.250 bolsas de almácigo de 17 cm x 23 cm.
- **1,68 t año<sup>-1</sup> de hongos comestibles** si la pulpa residual del proceso de obtención de pectinas se utiliza en su cultivo.

**Tabla 24.** Eficiencias biológicas del cultivo de *Pleurotus ostreatus* en la pulpa residual generada durante el proceso de obtención de pectinas.

Muestra	Peso Sustrato (g)	Humedad sustrato(%)	Hongos frescos (g)	Eficiencia biológica (%)
1	1.000	80,28	97,40	48,61
2	750	77,16	137,50	80,27
3	1.000	69,97	100,50	33,47
4	750	75,32	54,80	29,60
5	700	76,63	239,00	146,09
6	950	76,63	72,70	32,74
7	1.000	79,12	86,30	41,33
8	750	78,77	74,50	46,79
9	750	78,72	155,40	97,36
10	750	78,51	76,40	47,40
11	1.000	78,51	84,10	39,13
12	750	81,03	42,40	29,80
13	750	78,07	72,90	44,32
14	750	75,87	150,50	83,16
15	1.000	75,87	127,10	52,67
16	1.000	75,72	101,50	41,80
Promedio	853	77,26	104,56	55,91

**Tabla 25.** Rendimientos del proceso de producción de abono orgánico mediante lombricultura a partir de la pulpa de café residual proveniente del proceso de obtención de pectinas.

Muestra	Peso pulpa residual (g)	Humedad pulpa residual (%)	Peso seco pulpa residual (g)	Lombri compuesto (g)	Humedad Lombri compuesto (%)	Peso seco Lombri compuesto (g)	Rendimiento % bh	Rendimiento % bs
1	500	80,93	95,35	159,30	71,77	44,97	31,86	47,16
2	500	77,16	114,20	153,70	68,33	48,68	30,74	42,62
3	500	75,97	120,15	230,10	65,50	79,38	46,02	66,07
4	500	74,19	129,05	227,30	72,06	63,51	45,46	49,21
5	500	69,97	150,15	279,70	68,75	87,41	55,94	58,21
6	500	78,06	109,70	200,70	69,69	60,83	40,14	55,45
7	500	74,59	127,05	192,80	75,00	48,20	38,56	37,94
8	500	76,84	115,80	241,40	76,00	57,94	48,28	50,03
9	500	79,12	104,40	151,90	53,54	70,57	30,38	67,60
10	500	78,77	106,15	119,40	50,00	59,70	23,88	56,24
11	500	78,72	106,40	189,00	61,00	73,71	37,80	69,28
12	500	78,81	105,95	171,20	66,00	58,21	34,24	54,94
13	500	78,51	107,45	212,70	63,11	78,47	42,54	73,02
14	500	72,92	135,40	309,50	70,40	91,61	61,90	67,66
15	500	71,06	144,70	270,10	71,00	78,33	54,02	54,13
16	500	75,72	121,40	171,70	72,20	47,73	34,34	39,32
Promedio	500	76,33	118,33	205,03	67,15	65,58	41,01	55,56

(% bs): Porcentaje en base seca (% bh): Porcentaje en base húmeda

**Tabla 26.** Incremento de lombrices y tiempo de transformación en abono orgánico mediante el proceso de lombricultura realizado a la pulpa residual del proceso de obtención de pectinas.

Muestra	Lombriz inicial (g)	Lombriz final (g)	Incremento de lombrices (%)	Tiempo de proceso (d)
1	50	65,50	31,00	51
2	50	56,00	12,00	40
3	50	58,20	16,40	43
4	50	59,70	19,40	44
5	50	60,00	20,00	44
6	50	63,30	26,60	42
7	50	52,60	5,20	36
8	50	71,70	43,40	31
9	50	52,60	5,20	39
10	50	50,30	0,60	39
11	50	67,50	35,00	34
12	50	59,10	18,20	34
13	50	69,90	39,80	31
14	50	52,20	4,40	43
15	50	73,30	46,60	19
16	50	79,50	59,00	26
Promedio	50	61,96	23,93	37

contener pequeñas cantidades de otros lípidos, como fosfátidos de constituyentes insaponificables y de ácidos grasos libres naturalmente presentes en las grasas o aceites (ICONTEC, 2013).

A partir del aceite usado o de aquel que no presente las condiciones organolépticas y de calidad apropiada para ser utilizado como comestible puede elaborarse jabón (mezclando el aceite con hidróxido de sodio o de potasio) o biodiesel (mezclando el aceite con metanol o etanol).

A partir de las almendras de café y de la borra residual generada en la preparación de la bebida de café pueden obtenerse aceites para diferentes usos (Figura 32).

El aceite contenido en el grano de café verde o tostado tiene una composición química

similar a la de muchos aceites vegetales comestibles como el de la semilla de algodón, soya, maíz, coco, oliva y linaza, entre otros. Este aceite es líquido a temperatura ambiente y tiene una porción relativamente grande de compuestos no saponificables, que varía entre el 7,0% y el 12,0% (López & Castaño, 1999).

En Cenicafé, Calle (1960) evaluó el proceso de obtención de aceite a partir de la almendra de café, de la borra y de los granos de café de calidad inferior, considerando los altos contenidos de grasa en este tipo de materiales (Tablas 27 y 28).

### Aceite de la almendra de café.

El procedimiento de elaboración consistió en el desengrase de los granos trillados y molidos utilizando un solvente (etanol, hexano, éter



**Figura 32.** Aspecto del aceite de café obtenido a partir de las almendras.

de petróleo) y la separación de la cafeína utilizando otro solvente o refrigeración (Calle, 1960). Los rendimientos a escala piloto fueron del 12,5% (base seca) y a escala industrial del 10% (base seca). En la Tabla 27 se presenta la caracterización del aceite obtenido.

El aceite bruto obtenido de las almendras tiene un color oscuro, muy difícil de eliminar por tratamientos convencionales. Calle (1977), reporta que el mejor blanqueador es el peróxido de hidrógeno y que la merma en el proceso de refinación es apreciable, comparado con otro tipo de aceites. Por ejemplo, de cada 1.000 kg de aceite crudo de ajonjolí pueden obtenerse 970 kg de aceite refinado, mientras que por cada 1.000 kg de aceite crudo de café pueden obtenerse 600 kg de aceite refinado. Dado que se presentan muchas dificultades para refinar el aceite de café para su uso como comestible, se recomienda su utilización como materia prima para la fabricación de jabones (Calle, 1960).

### **Aceite de la borra de café.**

Calle (1960), en Cenicafé, reporta un rendimiento promedio de aceite obtenido de la borra del 10% en base seca, y Acosta & Celis (2021), en Colombia, reportan rendimientos del 13,08% en base seca. En la Tabla 28 se presentan algunos parámetros evaluados en el aceite obtenido. La extracción de aceite utilizando alcohol se presenta como una tecnología prometedora, que podría mejorar la viabilidad económica y técnica de la industria cafetera colombiana, debido al uso potencial del aceite obtenido de este subproducto en la industria alimenticia, cosmética y farmacológica.

### **Aceite de granos de café de calidad inferior.**

Calle (1977) reporta que pueden obtenerse entre 70 a 150 kg de aceite por tonelada de café de calidad inferior.

En Cenicafé, López & Castaño (1999) utilizaron granos de café pasilla y granos de café perforado por insectos (subproductos del proceso de la trilla del café pergamino seco) para la obtención de aceite, utilizando métodos de extracción por extrusión y extracción con solventes. Reportan que en la extracción por extrusión se obtiene un aceite fijo de café, con una alta carga volátil que lo caracteriza como un aceite esencial mientras que en la extracción con solventes se obtiene solo aceite fijo, con rendimientos de hasta el 8,73% (base seca) en los procesos de extracción por extrusión y hasta del 17,21% (base seca) en los procesos de extracción con solventes.

En la caracterización se encontró que el índice de saponificación promedio del aceite de café, obtenido por extrusión fue de 190,08 mg de KOH/g de aceite y de 241,17mg de KOH/g de aceite para el obtenido por extracción con

**Tabla 27.** Análisis del aceite de café obtenido a partir de las almendras. Fuente: Adaptado de Calle (1960).

Análisis	Valor
Índice de yodo	Entre 7,9 y 9,8 g/100 g
Índice de saponificación	Entre 160 y 180 mg g <sup>-1</sup>
Índice de Reichert Meissel	Entre 0,5 y 0,7 mL g <sup>-1</sup>
Índice de Polenske	Entre 0,2 y 0,3 mL g <sup>-1</sup>
Índice de refracción a 26°C	Entre 1,4722 y 1,4754
Acidez libre, en ácido oleico	0,27%
Porcentaje de ácidos saturados	39,4%
Porcentaje de insaturados	52,3%
Insaponificables	Entre 5,84 y 9,60%
Hidróxilo	0,2450 mmol g <sup>-1</sup>
Ácidos grasos totales	86,50%
Ácidos grasos líquidos	52,30%
Ácido palmítico	Entre 32,0% y 33,4%
Ácido esteárico	Entre 4,4% y 7,60%
Ácido linoleico	Entre 25,2% y 46,30%
Ácido hexadecenoico	0,90%
Ácido tetracosánico	1,6%
Ácido oleico	22,6%
Ácidos hidroxílicos insaturados	4,5%
Ácido en C20 y superiores	5,0
Densidad a 20°C	939 g L <sup>-1</sup>
Gravedad específica	0,95
Color	Ámbar rojo en el aceite refinado. Pardo oscuro en el aceite sin refinar

solventes. Para el caso del índice de yodo los valores encontrados fueron de 12,76 g/100 g de aceite para el caso de la extrusión y de 13,47 g/100 g de aceite, para el caso de la extracción con solventes (López & Castaño, 1999).

López (2007) reporta que el aceite de café extraído por extrusión presenta una gran variedad de compuestos volátiles (Tabla 29) que lo caracterizan como un aceite esencial.

La gran variedad de compuestos volátiles presentes en el aceite de café potencia su utilización como saborizante y aromatizante en la industria de alimentos. Además, por su composición, es utilizado en la industria cosmética y de cuidado personal.

### Mantecas y margarinas de aceite de café.

Calle (1977) reporta la producción de manteca y margarina por hidrogenación del aceite de café. La manteca resultó aceptable en color, olor y sabor, pero se oscureció con el tiempo, debido a los insaponificables que persisten en el aceite. Según el mismo autor, la margarina se elaboró mezclando aceite refinado de algodón con aceite refinado de café, en proporción ocho a dos. El aspecto y la calidad de la margarina obtenida de la mezcla fue normal y aceptable, sin oscurecimiento ni rancidez en el tiempo.

En la obtención de aceite solidificable (Figura 33), que permite incrementar sus usos, Calle (1977) reporta la adición de acetato de sodio al 5% al aceite obtenido.

**Tabla 28.** Análisis del aceite de café obtenido a partir de la borra. Fuente: Acosta & Celis (2021).

Análisis	Aceite extraído con etanol	Aceite extraído con hexano
Índice de peróxido	53,00 meq oxígeno/g de aceite	17,29 meq oxígeno/g de aceite
Índice de yodo	4,22 g/100g de aceite	17,39 g/100 g de aceite
Valor ácido	-	15,435 mg KOH/g aceite
Densidad	980 g L <sup>-1</sup>	970 g L <sup>-1</sup>

**Tabla 29.** Compuestos volátiles presentes en el aceite de café (López, 2007).

2-Furanometanol
1-(acetiloxi)-2-propanona
2,6-dimetil pirazina
Butilrolactona
5-metil-2-furanocarboxaldehido
Acetato-2-uranometanol
2,6-bis (1,1-dimetiletil)-4-metil fenol
1-etil-1-metil ciclohexano
2-metil-3-decen-5-ona
triacontano
Hexatriacontano
Tetratriacontano

## • Miel

La miel del café es un subproducto generado de la concentración de los jugos azucarados de la pulpa y del mucílago de café y ha mostrado ser de gran utilidad en la industria alimenticia y en la alimentación de cerdos (Valencia & Calle, 1968). Se presenta en la forma de un jarabe denso de color castaño oscuro, semejante a la miel de caña y de sabor dulce (Figura 34).

**A partir de una tonelada de café almendra pueden obtenerse 85 kg de aceite esencial, por extrusión (prensado), y 85 kg adicionales de aceite fijo, a partir de la extracción con solventes de las grasas aún presentes en la torta residual del proceso de extrusión.**



**Figura 33.** Aspecto del aceite solidificable obtenido a partir de las almendras de café.



**Figura 34.** Aspecto de la miel del café.

### Proceso de elaboración.

La miel del café se extrae despulpando sin agua los frutos maduros, la pulpa obtenida se exprime en una prensa hidráulica para obtener sus jugos (Figura 35) y el café despulpado se desmucilagina mecánica o enzimáticamente para obtener el mucilago puro (Figura 36) o se recibe en un tanque provisto de un doble fondo donde se lava con la mínima cantidad de agua, durante 10 minutos, por medio de una bomba recirculante, con el fin de extraer los azúcares del mucilago.

El mucilago o el agua de lavado de los azúcares del mismo se mezcla con los jugos



**Figura 35.** Aspecto de los jugos provenientes del prensado de la pulpa de café.



**Figura 36.** Aspecto del mucilago obtenido en la etapa de desmucilaginado mecánico.

provenientes del prensado de la pulpa y se concentran a fuego directo en la misma forma en que se obtiene la miel de caña (Valencia & Calle, 1968) (Figura 37).

### Rendimientos del proceso.

De acuerdo con lo reportado por Calle (1977), puede obtenerse un galón de miel (con un peso de 6,0 kg) a partir de la pulpa y el mucilago generados en el beneficio de 150 kg de frutos maduros.

### Composición de la miel.

Al comparar la composición de la miel de café con la miel de purga se determinó que ambas poseen el mismo tipo de azúcares (sacarosa, galactosa, glucosa, rafinosa y fructuosa), pero proporcionalmente esta última contiene menos cantidad de glucosa y de fructuosa que la miel de café (Valencia & Calle, 1968).

La mayor cantidad relativa de fructuosa contenida en la miel de café puede ser la que le da sus mejores características como alimento, dado que la fructuosa es el azúcar recomendado para diabéticos y la miel del café sería una buena fuente para su obtención.



**Figura 37.** Aspecto de la concentración por calor, de los jugos de la pulpa mezclados con el mucilago de café.

En la Tabla 30 se presentan algunas características de la composición de la miel de café y en la Tabla 31 se presenta el análisis mineral de las mieles de café y de caña.

Tanto de la pulpa de café y del mucilago de café, por separado, es posible obtener miel.

### Miel de la pulpa de café.

Se obtiene de la concentración de los jugos de la pulpa de café fresca. De acuerdo con Manrique & Monteblanco (2015), las etapas para su obtención son pre-cocción de la pulpa, escurrido, prensado, filtrado, concentrado y envasado.

### Miel del mucilago de café.

Se obtiene de la concentración del mucilago de café. De acuerdo con Manrique & Monteblanco (2015), las etapas para su

obtención son desmucilaginado, filtrado, concentrado y envasado.

En la Figura 38 se presenta el aspecto de la miel concentrada obtenida de los jugos de prensado de la pulpa y del mucilago de café y de la miel de caña.

En la Tabla 32 se presentan algunas características de la composición de la miel obtenida de la concentración de los jugos de pulpa y de la concentración de mucilago.

### Usos de la miel.

La miel elaborada se utilizó en la fabricación de caramelos con muy buena aceptación (Calle, 1977). Se realizaron ensayos en alimentación de cerdos en raciones comparadas con miel de caña, encontrando que la del café es prácticamente equivalente a la de caña en cuanto a la tasa de crecimiento

**Tabla 30.** Características de la composición de la miel de café (Calle, 1977).

Grados Brix	76,6
pH	4,90
Azúcares reductores	38,22%
Azúcares totales	54,27%
Acidez (Ácido cítrico)	1,05%
Cenizas	3,64%
Extracto etéreo	0,25%
Cafeína	0,32%
Nitrógeno total	0,68%
Humedad	21,06%
Sólidos totales	78,94%

**Tabla 31.** Análisis mineral de la miel de caña y de la miel de café (Calle, 1977)

Origen	Cenizas (%)	N (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	P (%)	Fe(mg L <sup>-1</sup> )
Caña	3,77	1,13	0,20	0,12	0,78	0,092	190
Café	18,42	0,89	0,18	0,14	1,68	0,097	440

+ Porcentaje en base seca

diario, pero con la ventaja de una mayor eficiencia de conversión alimenticia y que no laxa los animales como ocurre con la miel de purga (Valencia & Calle, 1968; Calle, 1977).

Manrique & Monteblanco (2015), reportan la elaboración de caramelos blandos cremosos tipo "toffee", utilizando miel de café y expresan que la miel tiene compuestos que les confieren propiedades especiales para la nutrición y salud de los consumidores (Tabla 33).



Figura 38. Aspecto de las mieles de café y caña.

## A partir de la pulpa y el mucílago generados en el beneficio de 1,5 t de frutos de café pueden obtenerse entre 10 y 18 galones de miel del café.

Tabla 32. Características de la composición de las mieles de pulpa y mucílago de café (Manrique & Monteblanco, 2015).

Parámetro	Miel de pulpa	Miel de mucílago
Rendimiento (%)	7,30	9,90
°Brix	60	60
pH	3,72	4,21
Acidez titulable	0,96	2,56
Azúcares reductores (mg/100 g)	73,44	82,39
Azúcares totales (g/ 100 g)	26,05	28,59
Polifenoles (mg de ácido gálico/L)	252,55	297,03
Actividad antioxidante (%)	18,03	26,02

**Tabla 33.** Características de la composición de los caramelos elaborados con mieles de pulpa y mucílago de café (Manrique & Monteblanco, 2015).

Parámetro	Toffee con miel de pulpa	Toffee con miel de mucílago
Rendimiento (%)	60,10	63,50
Acidez titulable	0,78	0,38
Azúcares reductores (mg/100 g)	30,91	41,37
Azúcares totales (g/100 g)	5,42	6,74
Humedad (%)	6,40	6,40
Cenizas (%)	3,91	3,91
Grasas (%)	7,13	7,13
Fibra (%)	0,06	0,06
Proteína (%)	2,01	2,01
Carbohidratos (%)	80,49	80,49
Polifenoles (mg ácido gálico/L)	63,21	85,99
Actividad antioxidante (%)	18,03	26,13

## • Levaduras alimenticias

Las levaduras alimenticias o nutricionales son un alimento con altos contenidos de proteína, vitaminas y minerales. Entre las más utilizadas están la levadura torula (*Torulopsis utilis* o *Candida utilis*) y la levadura de cerveza (*Saccharomyces cerevisiae*), que se obtienen mediante procesos de fermentación de las melazas procedentes de la remolacha, la caña de azúcar o los jugos de la pulpa y el mucílago de café.

La levadura torula se utiliza como aromatizante de los alimentos, tanto para consumo humano como para consumo animal, dado que posee un sabor similar al de la carne y es un nutriente rico en proteína y aminoácidos libres.

La levadura de cerveza se utiliza en la industria para la producción de alimentos y bebidas como pan, kumis, cerveza y vino, también se utiliza como suplemento alimenticio en la alimentación animal.

### Cultivo de levadura torula en jugos de pulpa de café.

Calle (1977), en Cenicafé, reporta que en el cultivo de torula sobre pulpa de café, esta última se hierve durante 30 minutos, en proporción uno a dos (pulpa-agua) y luego se filtra la mezcla por un lienzo, se dejan enfriar los jugos obtenidos de la pulpa (mosto) y se inoculan con la levadura torula a una relación al 2,5% v/v. Posteriormente, se adiciona aire a razón de 9 L/L de mosto-minuto. La máxima producción de levadura se alcanzó a las 40 horas de realizada la inoculación. El contenido de proteína en la levadura torula cultivada en los azúcares provenientes de la pulpa de café fue del 50,39% en base seca. En la Figura 39 se presenta un esquema del proceso productivo. Pueden obtenerse 100 g de levadura seca a partir de los jugos de la pulpa proveniente del beneficio de 15 kg de frutos de café (Calle, 1977).

### Cultivo de levadura de cerveza en jugos de pulpa de café.

Gualtieri et al. (2007), investigaron el cultivo de *Saccharomyces cerevisiae* sobre pulpa de

café previamente hidrolizada con ácidos. Reportan tiempos de fermentación de 8 horas y producción de 10 g de levadura/L de mosto. La composición química de *S. cerevisiae* sobre los jugos de la pulpa de café mostró un contenido de materia seca del 94,68% y contenidos en base seca del 41,5% para la proteína, 0,51% para las grasas, 0,48% para la fibra cruda, 5,53% para las cenizas y un contenido de carbohidratos del 52,35%

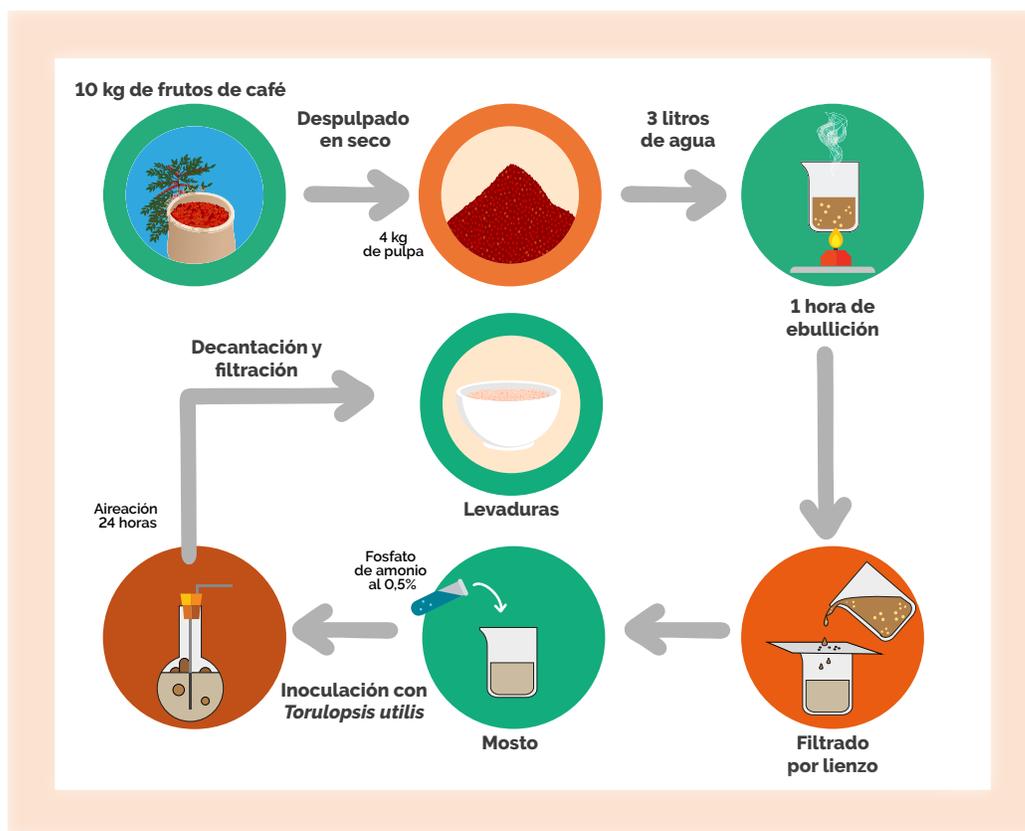
### Cultivo de levadura torula en jugos de pulpa y mucílago de café.

La levadura torula también puede cultivarse sobre los jugos de la pulpa y el mucílago, esterilizados con vapor de agua, durante 20 minutos, inoculados con levadura y a los cuales se les inyectó aire. En la Tabla 34 se

presenta una caracterización de la levadura seca obtenida.

Pueden obtenerse 750 g de levadura seca a partir de los jugos de la pulpa y el mucílago proveniente del beneficio de 100 kg de frutos de café (Calle, 1977).

**A partir de la pulpa y el mucílago generados en el beneficio de una tonelada de frutos de café pueden obtenerse 7,5 kg de levaduras alimenticias.**



**Figura 39.** Esquema de la producción de levadura torula sobre pulpa de café. Adaptado de Calle (1977).

**Tabla 34.** Composición de la levadura torula cultivada en los jugos de pulpa y mucilago de café (Calle, 1977).

Parámetro	Valor*
Humedad a 60°C	78,21%
Fibra cruda	3,40%
Cenizas	8,50%
Nitrógeno orgánico total	7,21%
Fósforo total	0,005%
Hidratos de carbono	15,60%
Proteína	44,81%
Calorías	616/100 g de levadura

+ Porcentaje en base seca

## • Antioxidantes

Los antioxidantes son moléculas capaces de retardar o prevenir la oxidación de otras moléculas. Las reacciones de oxidación se producen tanto en los alimentos como en el organismo humano y pueden producir radicales libres que inician reacciones en cadena que dañan las células y pueden provocar alteraciones fisiológicas desencadenantes de diversas enfermedades (Ortiz, 2012).

Muchas sustancias contienen gran cantidad de antioxidantes, siendo las más conocidas las vitaminas A, C y E. Algunos alimentos contienen sustancias antioxidantes como los flavonoides y compuestos fenólicos. Tanto el café, como el té y el vino, contienen importantes antioxidantes fenólicos, tales como los ácidos clorogénico y cafeico, en algunos aspectos similares a las epicatequinas y taninos del té o las quercetinas del vino tinto, pero con diferentes estructuras químicas y, por lo tanto, distintas funciones metabólicas. En el café almendra existe una gran cantidad y variedad de compuestos fenólicos, pero al tostarse, se afecta marcadamente su composición en fenoles, lo cual le confiere un agradable sabor y aroma, y se originan pigmentos denominados melanoidinas,

durante la reacción de Maillard, dando al café tostado su color característico. El ácido clorogénico es el polifenol preponderante en el café, aunque hay otros como son el cafeico, el ferúlico y el p-cumárico (Gutiérrez, 2002).

Desde hace algunos años se ha incrementado el interés en el consumo de antioxidantes en dietas alimenticias para prevenir el desarrollo de enfermedades cardiovasculares, cerebrovasculares, algunas formas de cáncer y otros desórdenes como diabetes y enfermedades reumatoideas.

### Capacidad antioxidante y contenido de compuestos fenólicos y flavonoides en hojas, pulpa, mucilago y café almendra.

Ortiz (2012), en Cenicafé, determinó los contenidos de compuestos fenólicos, flavonoides y la capacidad antioxidante de los extractos cetónicos y metanólicos obtenidos de la pulpa, el mucilago, las hojas y los granos de café sin tostar. Encontró que las hojas del café tienen una alta capacidad antioxidante, superior a los demás órganos evaluados y la pulpa de café se constituye en una materia prima importante para la obtención de antioxidantes, dado los contenidos encontrados en ella y las grandes

cantidades de pulpa que se generan en los países productores del grano.

Existen diversos métodos para evaluar la capacidad antioxidante de un compuesto, mezcla o alimento, que consisten en determinar la actividad del antioxidante frente a sustancias cromógenas de naturaleza radical, en las cuales la pérdida de color ocurre de forma proporcional con la concentración del antioxidante. Diversos compuestos cromógenos (ABTS, DPPH, DMPD, DMPO y FRAP) son utilizados para determinar la capacidad de los compuestos fenólicos, presentes en los frutos, para captar los radicales libres generados, operando así en contra de los efectos perjudiciales de los procesos de oxidación (Kuskoski et al., 2005).

En la Tabla 35 se presentan los contenidos de compuestos fenólicos (antioxidantes) obtenidos de diferentes partes de la planta de café, utilizando extracción con cetona y metanol.

En la Tabla 36 se presentan los contenidos de flavonoides (antioxidantes) obtenidos de diferentes partes de la planta de café, utilizando extracción con cetona y metanol.

En la Tabla 37 se presentan los resultados de la capacidad antioxidante medida por el método DPPH (1,1-difenil-2-picrilhidracilo) obtenidos de diferentes partes de la planta de café, utilizando extracción con cetona y metanol.

### Compuestos antioxidantes en la pulpa de café.

Arellano-González et al. (2011) determinaron que la pulpa de café contiene antioxidantes naturales como los ácidos hidroxicinámicos, la mayoría de los cuales están unidos covalentemente a la pared celular y que pueden ser liberados por fermentación o procesos enzimáticos. Determinaron los contenidos de antioxidantes en muestras de

**Tabla 35.** Contenido de compuestos fenólicos (medidos como equivalente de ácido gálico) en algunas estructuras de la planta de café (Ortiz, 2012).

Material	mg de ácido gálico/g MS Extracción con Cetona	mg de ácido gálico/g MS Extracción con Metanol
Almendras de café	5,22	33,59
Hojas de café	72,06	33,37
Mucilago de café	5,21	6,26
Pulpa de café	11,25	24,83

MS: Muestra seca

**Tabla 36.** Contenido de flavonoides (medidos como equivalente de catequina) en algunas estructuras de la planta de café (Ortiz, 2012).

Material	mg de catequina/g MS Extracción con Cetona	mg de catequina/g MS Extracción con Metanol
Almendras de café	5,53	42,20
Hojas de café	85,32	29,48
Mucilago de café	0,00	0,00
Pulpa de café	10,70	17,27

MS: Muestra seca

**Tabla 37.** Capacidad antioxidante (medida como equivalente de trolox) en algunas estructuras de la planta de café (Ortiz, 2012)

Material	$\mu\text{mol}$ de trolox/g MS Extracción con Cetona	$\mu\text{mol}$ de trolox/g MS Extracción con Metanol
Almendras de café	24,20	147,61
Hojas de café	393,94	271,34
Mucilago de café	1,25	13,24
Pulpa de café	70,95	145,45

MS: Muestra seca

pulpa fresca y fermentada en estado sólido usando el hongo *Aspergillus tamarii*, utilizando extracción con metanol y su capacidad antioxidante con el método ABTS, reportando que no hubo diferencias significativas en el contenido total de polifenoles en pulpa de café fresca ( $335,0 \text{ g kg}^{-1}$  de pulpa seca) y fermentada ( $322,4 \text{ g kg}^{-1}$  de pulpa seca), pero el contenido de ácidos hidroxicinámicos totales fue mayor en los extractos de pulpa de café fresca ( $47,1 \text{ g kg}^{-1}$  de pulpa seca) respecto a la pulpa de café fermentada ( $30,9 \text{ g kg}^{-1}$  de pulpa seca). La pulpa de café tiene un alto potencial como fuente natural de antioxidantes.

### Compuestos antioxidantes en pulpa de café, cascarilla de café, película plateada, café almendra y café tostado.

Fonseca-García et al. (2014) evaluaron el contenido de fenoles totales y su capacidad antioxidante en muestras de café y subproductos del mismo producidos en el departamento de Norte de Santander (Colombia), utilizando los métodos FRAP y ABTS. Reportan que el contenido de fenoles totales estuvo entre  $1.129$  y  $2.582 \text{ mg}$  de ácido gálico equivalente/g café para las muestras comerciales de café y su capacidad antioxidante varió entre  $3.095$  y  $6.857 \mu\text{mol}$  trolox equivalente/g café para FRAP, y entre  $224,0$  y  $245,0 \mu\text{mol}$  trolox equivalente/g café para ABTS. En el caso de las muestras de café almendra y los residuos, los resultados del

contenido fenoles y su capacidad antioxidante se presentan en la Tabla 38. Todas las muestras evaluadas presentaron capacidad antioxidante y fenoles totales, incluidos los residuos del procesamiento del café como el pergamino, la película plateada y la pulpa de café. Por lo tanto, se confirma el potencial de los residuos de café como fuentes naturales de antioxidantes.

### Compuestos antioxidantes en la cascarilla de café.

Mirón-Mérida et al. (2019) determinaron los contenidos de fenoles totales y su capacidad antioxidante en muestras de pergamino de café. Reportan contenidos de  $2,14 \text{ g}$  de ácido gálico equivalente/g seco de pergamino y una capacidad antioxidante, medida mediante la metodología ABTS, de  $14,5 \mu\text{mol}$  de trolox equivalente/g seco de pergamino.

### Compuestos antioxidantes en la película plateada de café.

Sánchez & Anzola (2012) determinaron los contenidos de fenoles totales y su capacidad antioxidante en muestras de película plateada de *Coffea arabica* variedades Caturra y Colombia. Para la cuantificación del contenido de fenoles realizaron la extracción con metanol-acetona y para la capacidad antioxidante utilizaron las metodologías ABTS, FRAP y DPPH. Los resultados de la investigación se presentan en la Tabla 39. Los autores concluyen que la película plateada

**Tabla 38.** Contenido de fenoles totales y capacidad antioxidante (medida como equivalente de trolox) en algunas estructuras de la planta de café (Fonseca-García et al., 2014).

Muestra	Fenoles totales mg ácido gálico eq/g MS	Capacidad antioxidante μmol trolox equivalente /g MS FRAP	ABTS
Café almendra	735 - 1.904	1.671-1.894	223,2 – 233,0
Película plateada	52,57 -97,44	2,27 -7,86	71,78 – 128,50
Pergamino	102,6 -647,5	10,72 – 64,32	97,26- 131,20
Pulpa	252,2 -346,9	58,73 – 72,97	91,49 -158,00

MS: Materia seca

proveniente de las dos variedades de café estudiadas presenta un alto contenido de fibra dietaria total, con alta relevancia de fibra insoluble y marcada actividad antioxidante, por lo cual tiene un alto potencial como ingrediente funcional en la industria alimenticia, para ser adicionada en alimentos de consumo masivo como pan, galletas, carnes o embutidos, entre otros.

## • Alimentos para consumo animal

Teniendo en cuenta los altos precios de los concentrados utilizados en la alimentación animal, que tienen una influencia directa en los costos de producción, cada vez se hace

más necesaria la búsqueda de materiales no convencionales que sean digestibles por las especies y que les aporten nutrimentos, ya sea como material base o como alimento suplementario.

Los subproductos generados en el proceso de beneficio e industrialización del café pueden utilizarse directamente o después de ser transformados, como materias primas en la elaboración de raciones para la alimentación animal.

### Utilización de la pulpa de café en la alimentación animal.

La pulpa de café se ha utilizado como suplemento de las dietas alimenticias en

**Tabla 39.** Contenido de fenoles totales y capacidad antioxidante en la película plateada obtenida de las variedades Caturra y Colombia (Sánchez & Anzola, 2012).

Determinación	Variedad Caturra	Variedad Colombia
Fenoles totales (% de ácido cafeico)	1,19	1,30
Capacidad antioxidante por el método FRAP (mmol de trolox equivalente/100 g).	8,10	6,71
Capacidad antioxidante por el método ABTS (mmol de trolox equivalente/100 g).	4,36	3,11
Capacidad antioxidante por el método DPPH (mmol de trolox equivalente/100 g).	1,18	1,26

aves de corral, cerdos y ganado vacuno, entre otros.

### Alimentación de pollos.

Calle (1977), en Cenicafé, reporta la alimentación de pollos utilizando pulpa de café ensilada y proveniente de los procesadores y peletizada, después de ser mezclada con otros ingredientes de la dieta como maíz amarillo, salvado de trigo, harina de carne, aceite de hígado, mezcla mineral, cal apagada y sal, en la cual la pulpa de café representó el 60%. Se registró una tasa de aumento en peso diario de 16 g/animal para la dieta con pulpa ensilada y de 17 g/animal para la dieta con pulpa de los procesadores, mientras que para el testigo (dieta sin pulpa de café) la tasa de aumento en peso diario fue de 13 g/animal, concluyendo que los aumentos de peso en los pollos alimentados con raciones suplementadas con pulpa de café fueron satisfactorios y demuestra que puede utilizarse la pulpa de café provenientes de los procesadores, dado que la proliferación de larvas en los mismos producen proteína animal que es aprovechada en la avicultura.

Calle (1977) reporta la inoculación de pulpa de café con larvas de la mosca verde y su posterior utilización en la ración alimenticia de pollos mezclada con 50% de maíz amarillo. Después de 50 días de seguimiento, la tasa de crecimiento de los pollos fue 0,4% para aquellos alimentados con la ración suplementada con pulpa larvada, respecto a la ración testigo.

Campabadal (1987) reporta la utilización de pulpa de café como parte de la dieta alimenticia tanto en pollos de engorde como en aves de postura, encontrando para pollos de engorde un nivel máximo de utilización de la pulpa entre el 2,5% y el 5,0% para inicio, desarrollo y postura. Los resultados de estas pruebas de alimentación demuestran que la pulpa de café puede ser una alternativa adecuada en la alimentación animal, siempre

y cuando se utilicen niveles bajos en las diferentes especies evaluadas y que su precio de mercado sea competitivo para poderla sustituir por el grano de la ración.

### Alimentación de cuyes.

Yoplac et al. (2017), investigaron la suplementación de la dieta alimenticia de cuyes con pulpa de café. Realizaron la investigación con 35 cuyes hembras, desde los 28 hasta los 91 días de edad, alimentados con dietas a base de alfalfa y concentrado (1:1). Los cuyes fueron distribuidos al azar en cinco tratamientos, con inclusiones en el concentrado de 0%, 5%, 15%, 25% y 35% de harina de pulpa de café. La adición de la harina de pulpa de café al concentrado no influyó en la ganancia de peso, conversión alimenticia y calidad sensorial (apariencia, olor, color de la carcasa y sabor de la carne), pero tuvo una relación inversa con el consumo alimenticio. Los mayores rendimientos de carcasa (peso completo del animal) se obtuvieron hasta la inclusión de 25% de harina de pulpa de café en el concentrado. Concluyen que la harina de pulpa de café como insumo para formular concentrados para cuyes, tiene potencial para incrementar los índices productivos.

La harina de pulpa de café utilizada en la ración alimenticia de los cuyes presentó la siguiente composición: 10,09% de humedad, 3,48% de extracto etéreo, 14,03% de proteína, 19,29% de fibra cruda, 11,95% de cenizas, 13,92% de almidón, 10,00% de azúcares reductores, 38,78% de fibra detergente neutra y 26,64% de fibra detergente ácida (Yoplac et al., 2017).

### Alimentación de peces.

García & Bayne (1974), citados por Noriega et al. (2008), reportan la utilización de pulpa de café en la alimentación de *Tilapia aureus* (tilapias). Los autores evaluaron tres tratamientos que consistieron en un grupo control que no recibió suplemento alimenticio, un grupo alimentado con gallinaza y un grupo

alimentado con *pellets* que contenían 30% de pulpa de café, más afrecho de trigo, maíz molido, melaza de caña, harina de semilla de algodón, urea y harina de hueso, con el mayor aumento de peso de los animales alimentados con la mezcla de pulpa de café, superior en el 53,41% comparado con el grupo control y superior en el 85,97% respecto al grupo alimentado con gallinaza.

Castillo et al. (2002), citados por Noriega et al. (2008), evaluaron el efecto de la inclusión de la pulpa de café deshidratada en las dietas para alevines de *Oreochromis aureus* x *Oreochromis niloticus* (tilapia roja) con peso inicial entre 1,10 y 1,12 g. Se prepararon cuatro tratamientos: testigo sin pulpa de café y dietas con 10%, 20% y 30% de pulpa de café. Los resultados demostraron que el mejor comportamiento lo presentaron los alevines con la dieta testigo y con 10% de pulpa de café, con peso final de 11,24 y 11,46 g, respectivamente. Los autores concluyen que puede incluirse la pulpa de café hasta el 20% en dietas para alevines de tilapia, sin afectar los índices productivos del animal.

Bautista et al. (2005), citados por Noriega et al. (2008), evaluaron el desarrollo de alevines de *Colossoma macropomum* x *Piaractus brachypomus* (híbrido cachamay), alimentados con raciones compuestas por dos tipos de pulpa ensilada (sin melaza y con 5% de melaza). Cada tipo de pulpa de café se evaluó en diferentes niveles de inclusión: 10%, 15% y 18%, respecto al tratamiento testigo sin pulpa. Los resultados demostraron que la mejor tasa de crecimiento en peso y longitud fue para la dieta de 18% de pulpa con 0,53 g d<sup>-1</sup> y 0,68 mm d<sup>-1</sup>, respectivamente. Concluyeron que la pulpa de café ensilada puede ser empleada hasta un 18% en la alimentación de alevines de cachamay.

### Alimentación de cerdos.

Campabadal (1987), en investigaciones de alimentación animal con subproductos del

café reporta que la pulpa puede sustituir hasta en un 2,5% al maíz en la ración alimenticia de cerdos, con un consumo de alimento por parte de los mismos de 0,878 kg d<sup>-1</sup>, una ganancia de peso de 0,459 kg d<sup>-1</sup> y una conversión alimenticia de 1,93, sin problemas de palatabilidad en el alimento.

Bautista et al. (1999), citados por Noriega et al. (2008), determinaron la ganancia de peso, el consumo de alimentos y la conversión alimenticia en cerdos de crecimiento y engorde, alimentados con pulpa de café ensilada con melaza en niveles de 0%, 5%, 10%, 15% y 20% de la ración y concluyeron que es posible utilizar en cerdos los niveles de 20% de pulpa de café ensilada en la etapa de crecimiento y 15% en la de engorde, sin ocasionar pérdidas en los parámetros productivos cuando se compara con los proporcionados a través del alimento comercial.

### Alimentación de ganado de carne y leche.

Flores (1976), citado por Noriega et al. (2008), establece que la pulpa de café deshidratada y molida puede ser suministrada hasta en un 20% como suplemento en vacas lecheras, sin causar efectos detrimentales. Vargas et al. (1977), citados por Noriega et al. (2008), alimentaron novillos Holstein con alimento concentrado y sustitución del 20%, 40% y 60% de pulpa de café deshidratada, reportando disminución en la ganancia de peso diaria, cuando se incrementaban los niveles de pulpa de café en las dietas. De igual manera, concluyeron que el consumo de elevadas proporciones de pulpa en terneros trae como consecuencia retardo en el crecimiento.

De acuerdo con Campabadal (1987), por su composición nutritiva, la pulpa de café representa una mejor alternativa en la alimentación de rumiantes que de monogástricos, por tener los primeros la habilidad de digerir la fibra en forma más

eficiente. El autor reporta que, para producción de leche el nivel máximo de pulpa de café en la dieta alimenticia del ganado fue del 8% y que con niveles superiores muchos animales rechazaron el alimento por problemas de olor de la pulpa de café. Para ganado de doble propósito (carne y leche), el autor reporta niveles de pulpa de café hasta del 10% en la dieta alimenticia.

Noriega et al. (2008) establecen que, durante el manejo intensivo del ganado bovino de carne en los países tropicales, el uso de la pulpa del café puede alcanzar entre 20% y 30% en las raciones. En vacas lecheras, la pulpa de café ensilada puede ser incorporada entre 20% a 40% del concentrado y de 10% a 20% de la materia seca de la ración completa, sin disminuir la producción de leche; aunque, en novillos puede reducir la ganancia de peso diaria.

### **Utilización del mucilago de café en la alimentación animal**

El mucilago de café se ha utilizado como suplemento de las dietas alimenticias en cerdos y ganado vacuno, entre otros.

### **Alimentación de cerdos.**

En Cenicafé, Garavito & Puerta (1998) evaluaron la utilización del mucilago de café en la alimentación porcina (Figura 40), encontrándose que al suministrar el 80% de concentrado, de acuerdo con los requerimientos del animal según su peso y suplementar la ración iniciando con 2 L de mucilago de café diario, en animales con pesos superiores a 40 kg, se obtienen buenas respuestas en conversión del alimento, ganancia en peso y rendimiento económico, sin afectar la calidad de la carne. Se concluye que es posible utilizar el mucilago del café en la alimentación porcina, teniendo presente que no debe emplearse como única fuente de

alimento, ya que no supe los requerimientos nutricionales y energéticos del cerdo.

### **Alimentación de rumiantes.**

Pinto et al. (2014) evaluaron la incorporación del mucilago de café en la fabricación de bloques nutricionales para rumiantes y sus efectos en las variables de fabricación, composición química y preferencia animal. Utilizaron bloques nutricionales elaborados con distintos porcentajes de mucilago de café (0%, 25%, 50%, 75% y 100%) en sustitución de la melaza, además de los ingredientes base como maíz y minerales. Los resultados indican que es factible la incorporación de mucilago de café en la fabricación y consumo de bloques nutricionales hasta en un 75%, en sustitución de melaza de caña, ya que no se producen alteraciones en la composición química de éstos, además que la preferencia animal es mayor.

### **Utilización de la levadura de cerveza en la alimentación animal.**

La levadura de cerveza (*Saccharomyces cerevisiae*) puede producirse sobre los jugos de la pulpa y el mucilago de café. Una vez cosechada se puede secar y utilizar en la alimentación animal. Suárez-Machín & Guevara-Rodríguez (2017) reportan que la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, se ha empleado en la alimentación animal en distintas proporciones como parte de la dieta, 10% en bovinos, 5% en ovinos y en las aves entre 3% y 4%. Concluyen que el uso de esta levadura es una opción a considerar si se quiere alimentar eficientemente a los rumiantes, logrando mejoras en los indicadores productivos de los animales, gracias al contenido proteico de esta levadura y a su efecto probiótico, cuando son utilizadas vivas. Los probióticos son microorganismos vivos que, al adicionarse en la dieta, favorecen la digestión y ayudan al mantenimiento del equilibrio de la flora microbiana en el intestino.

Aceijas (2017) expresa que probióticos y prebióticos (ingredientes no nutricionales y no digeribles que afectan benéficamente al hospedero estimulando selectivamente el crecimiento), elaborados a base de la levadura *S. cerevisiae*, son considerados como Antibióticos Promotores de Crecimiento (APC) y son generalmente incluidos en dietas de cerdos en las etapas de crecimiento – acabado, para lograr una mayor eficiencia en la conversión alimenticia. El mismo autor establece que al suplementar la dieta, en la etapa de engorde de los cerdos, con *S. cerevisiae*, en proporciones entre el 0,025% y el 0,100%, se logra un mejor consumo de alimento, un mayor peso al sacrificio y una mejor conversión alimenticia debido a su acción como probiótico en el tracto intestinal.

### Utilización de la harina de la mosca soldado negro en la alimentación animal.

*Hermetia illucens* (mosca soldado negro) se utiliza en el proceso de elaboración de abono orgánico a partir de la pulpa de café, generando larvas que pueden utilizarse directamente para la alimentación animal o para la elaboración de harina utilizada como suplemento en raciones para la alimentación animal.

Arango et al. (2004) estudiaron el valor nutritivo de la harina de las larvas de *Hermetia illucens* a partir del análisis composicional, prueba de digestibilidad y calidad microbiológica, comparada con una materia prima convencional como la harina de pescado y con otro díptero como la *Musca domestica*. Determinaron que la harina de las larvas de la mosca soldado negro, por su análisis proximal (Tabla 40) puede ser considerada un ingrediente proteico que presenta una alta digestibilidad, que la convierte en una materia prima promisoría en la alimentación animal.

Apaza (2020) evaluó la inclusión de harina de larvas de la mosca soldado negro en diferentes

niveles en la formulación de raciones alimenticias para pollos (0%, 15%, 25% y 40%), como reemplazo del requerimiento proteico total y obtuvo los índices productivos de los mismos criados en las mismas condiciones de ambiente, genética, sexo y manejo. La única diferencia fue la inclusión de harina de larva de mosca soldado negro en sus raciones alimenticias para cada etapa, durante 42 días, considerando a la soya como fuente proteica estándar. Los índices productivos no mostraron diferencia estadística significativa. La aceptabilidad de la inclusión de harina de larva de mosca soldado negro fue positiva en la formulación de raciones alimenticias, mostrando mejores resultados en inclusiones de harina de larva de mosca soldado negro hasta del 40%.

Figueredo & Albarracín (2021) establecen que la harina de larvas de la mosca soldado negro por sus valores altos de proteína cruda (38,5% a 62,7%), grasas (6,63% a 39,2%) y minerales (manganeso, hierro, zinc, cobre, fósforo y calcio), puede ser incluida en alimentos balanceados para monogástricos (aves, cerdos, peces, mascotas). Reportando



**Figura 40.** Incorporación del mucilago de café como suplemento en la alimentación de cerdos.

**Tabla 40.** Composición de la harina de larvas de la mosca soldado negro y comparación con la harina obtenida de larvas de la mosca doméstica y la harina de pescado (Arango et al., 2004).

Parámetro	Harina de larvas de <i>Hermetia illucens</i>	Harina de larvas de <i>Musca domestica</i>	Harina de pescado
Humedad (%)	10,00	10,00	10,00
Proteína (%)	36,98	56,70	60,99
Grasas (%)	18,82	8,10 – 13,50	10,49
Cenizas (%)	17,47	4,95	17,40
Calcio (%)	7,60	-	4,40
Fósforo (%)	0,58	-	2,24

estudios en los cuales se ha reemplazado el 25% (en cerdos) y el 100% (en aves) la harina de soya.

En sistema de producción acuícola se reportan estudios de consumo de la harina de la mosca soldado negro por especies de la familia Salmonidae (trucha y salmón) reemplazando el contenido de harina de pescado entre un 50% al 100%, sin alterar su eficiencia productiva (Figueredo & Albarracín, 2021).

## • Alimentos para consumo humano

A partir de los subproductos del café pueden obtenerse harinas para panificación, mermeladas, té y vino, entre otros, que pueden utilizarse para el consumo humano.

### Harina de café sin tostar para panificación.

En Cenicafé, Calle (1958) investigó la obtención de harina de café a partir de granos de calidad inferior. El procedimiento utilizado consistió en la hidratación de los granos utilizando agua hirviendo y dejando en reposo durante la noche. Posteriormente los granos hidratados se sometieron a una hidrólisis ácida en soluciones diluidas de HCl al 2% y se autoclavaron a 121°C y 15 psi de

presión durante 30 minutos. Seguidamente los granos se lavaron para retirar los ácidos, se molieron, secaron y tamizaron para obtener la harina. Con la harina elaborada por hidrólisis ácida y cuya composición se muestra en la Tabla 41, se elaboraron panes y pasteles, comprobándose que puede mezclarse hasta el 50% con harina de trigo, sin desmejorar las cualidades leudantes (aumento de tamaño y calidad de cocción) y fermentativas del producto, los cuales han sido completamente aceptados por los consumidores. Los panes y pasteles se caracterizaron por tener buen sabor y textura.

### Harina de pulpa de café para galletería y pan dulce.

Ponce (2018) investigó el efecto de la sustitución parcial de la harina de trigo por harina de pulpa de café (*Coffea arabica*) en galletas dulces. Las galletas se elaboraron con sustitución parcial de la harina de trigo por harina de pulpa entre el 20% y 25%. Los autores concluyen que la harina de pulpa de café presenta un menor pH y una mayor acidez, además es más oscura y presenta mayor contenido de Ca, Na, K, Fe y Zn, que la harina de trigo. Las características físicas de las galletas dulces obtenidas con harina de pulpa de café no mostraron diferencias significativas frente al testigo (sólo harina de trigo); sin embargo, presentaron una mayor acidez, más oscuridad, menor dureza y mayor fracturabilidad frente al testigo. La evaluación

**Tabla 41.** Composición de la harina de café sin tostar y comparación con la harina de trigo (Calle, 1958).

Parámetro	Café excelso sin tostar, sin hidrolizar	Pasilla sin tostar, sin hidrolizar	Pasilla hidrolizada HCl al 10%	Pasilla hidrolizada HCl al 1% y esterilizada	Harina de trigo
Humedad (%)	5,55	3,95	6,02	-	-
Cenizas (%)	4,22	3,50	0,46	0,69	0,52
Nitrógeno (%)	2,17	2,03	1,53	1,81	1,94
Proteína (%)	13,58	12,68	9,53	11,32	11,02
Carbohidratos (%)	45,64	46,41	35,06	-	-
Extracto etéreo (%)	15,13	12,70	27,23	22,01	-
Fibra cruda (%)	16,20	20,68	20,00	-	-

sensorial no mostró diferencias frente al testigo hasta un 20% de sustitución, logrando calificativos entre me gusta poco y me gusta.

Las galletas dulces con harina de pulpa de café presentaron un mayor contenido de Ca, Mg, K, Na, Cu, Mn, Zn y Fe, frente al testigo, lo que demuestra que la harina de pulpa de café puede ser utilizada en galletas dulces hasta un 20% de sustitución sin afectar significativamente sus características y mejorando su contenido de minerales (Ponce, 2018).

Madrigal & Chavarría (2020) reportan el uso de harina de pulpa de café en la elaboración de pan dulce. La harina de la pulpa de café presentó un contenido de humedad del 9,44% y contenido de cenizas del 8,98%, fibra del 7,20%, grasas de 1,46%, proteína cruda del 10,95% y antioxidantes de 17,08  $\mu$ moles/100 g y se utilizó en la preparación del pan dulce reemplazando el 60% de la harina de trigo.

### Harina de cascarilla de café para elaboración de brownies.

Barrera & Sánchez (2020) investigaron el aprovechamiento de la fibra presente en la cascarilla de café en la sustitución de grasas para elaboración de brownies. Para ello,

realizaron sustituciones de 0%, 25%, 50%, 75% y 100% de la mantequilla con la harina de la cascarilla, con el fin de cuantificar el cambio en el perfil de textura de la masa y el producto horneado y realizaron un estudio sensorial con un panel de personas que respondieran una serie de preguntas sobre la similaridad física entre los brownies, para cuantificar subjetivamente el cambio que representa la mejor sustitución. Como resultado de este estudio se encontró que el brownie que presentaba propiedades similares al control y la mayor cantidad de sustitución era el de 50%. El panel sensorial determinó que, las muestras evaluadas no presentaban diferencias significativas en cuanto a esponjosidad, aceptabilidad, textura y apariencia.

### Harina de película plateada de café para panificación.

Yañez (2018) utilizó la película plateada del café, en una proporción del 3,6% con respecto a la harina de trigo, como ingrediente en la elaboración de pan. El autor reporta, con base en los resultados de la investigación, que la película plateada puede utilizarse como un fortificante dentro de la panadería debido a la cantidad de fibra dietética que posee, misma que podría aportar favorablemente en dietas

para deportistas, cuyo rendimiento se basa en una alimentación basada en carbohidratos y proteínas.

### Bebida instantánea de pulpa de café.

Iriondo-Dehond et al. (2020), investigaron la obtención de una bebida instantánea a partir de la pulpa de café secada al sol (proveniente de *Coffea arabica* sembrado en Colombia) y su impacto como bebida segura y saludable. El extracto de la pulpa de café se obtuvo por extracción acuosa y liofilización, analizando sus contenidos de proteína, aminoácidos, lípidos, ácidos grasos, azúcares, fibra, minerales y vitaminas para su caracterización nutricional. Los contenidos de acrilamida y cafeína se utilizaron como indicadores de seguridad de la bebida. Se estudió la estabilidad a 40°C de los compuestos coloreados (conocidos como melanoidinas), presentes en el extracto y su capacidad antioxidante *in vitro*. Se obtuvo una bebida instantánea y segura con propiedades antioxidantes (Tabla 42) a la cual pueden adicionársele las etiquetas de: "bajo en grasa",

"bajo en azúcar", "alto en fibra" y "fuente de potasio, magnesio y vitamina C". Los autores reportan que la bebida obtenida es una posible alternativa sostenible para el café instantáneo, con un bajo contenido de cafeína y acrilamida y una composición saludable por la presencia de nutrientes y antioxidantes.

### Té de pulpa de café.

Heeger et al. (2017) reportan la elaboración de una bebida refrescante a partir de la pulpa de café (Figura 41). La extracción acuosa de la pulpa de café mostró un contenido de polifenoles totales entre 4,9 y 9,2 mg equivalentes de ácido gálico (GAE)/g Materia Seca (MS). La capacidad antioxidante estuvo entre 51 y 92 µmol de equivalentes de Trolox (TE)/g MS medido por el ensayo con el radical ABTS. Los contenidos de cafeína estuvieron entre 6,5 y 6,8 mg g<sup>-1</sup> MS. En todas las muestras estaban presentes el ácido clorogénico, el ácido protocatecúico y el ácido gálico. La bebida de pulpa de café se elaboró con 65,6 g de materia seca/L de agua, se hizo la infusión durante 6,5 minutos a 90°C, se

**Tabla 42.** Nutrientes y antioxidantes presentes en la bebida instantánea de pulpa de café (Iriondo-Dehond et al., 2020).

Parámetros	Bebida (4 mg mL <sup>-1</sup> )	Bebida (10 mg mL <sup>-1</sup> )
Nutrientes		
Carbohidratos totales (g/100 mL)	27,50	47,48
Glucosa (g/100 mL)	0,04	0,05
Antioxidantes		
Fenoles totales (mg eq. CGA/mL)	0,25	0,89
ABTS (mg eq. CGA/mL)	16,82	27,58
FRAP (mg eq. CGA/mL)	0,15	0,43

CGA: Ácido clorogénico

ABTS: Capacidad antioxidante por 2,2-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)

FRAP: Capacidad antioxidante por Ferric Reducing Antioxidant Power Assay.

agregó azúcar ( $71 \text{ g L}^{-1}$ ) y jugo de limón ( $5,7 \text{ mL L}^{-1}$ ), la bebida se embotelló y pasteurizó a  $83^\circ\text{C}$  durante 30 minutos. La bebida obtenida mostró contenidos de  $226 \text{ mg L}^{-1}$  de cafeína y  $283 \text{ mg GAE/L}$  de polifenoles totales y una capacidad antioxidante de  $8,9 \text{ mmol TE/L}$ .

### Té de flores de café.

Nguyen et al. (2019) reportan la obtención de una bebida preparada a partir de las flores del café, secadas a  $50^\circ\text{C}$ . Los autores reportan la utilización de agua caliente a presión durante 75 minutos para la extracción de los compuestos bioactivos, melanoidinas y bioazúcares presentes en las flores. La cafeína y la trigonelina fueron los principales compuestos extraídos de las flores del café (rendimientos de 1,07% y 1,09% p/p, respectivamente). Las melanoidinas representaron el 30,2% de la materia seca, se obtuvo bioazúcar a partir de celulasas y pectinasas (rendimientos del 92,8%) y compuestos bioactivos ( $0,724 \text{ mg}$  ácido gálico equivalente/g de fenoles totales). Estos resultados indican que las flores del café pueden ser consideradas como una bio-fuente de productos de valor agregado como té instantáneo, bioazúcares o alimentos saludables y funcionales y, por lo tanto, las flores del café deben agregarse a la lista de recursos que pueden ser aprovechado de los cafetos.

### Té de hojas de café.

En Cenicafé, Calle (1977) reporta la elaboración de infusiones a partir de hojas de café tostadas y molidas que generaron una bebida del color del té, aromática y agradable al paladar y de sabor diferente al café.

Ratanamarno & Surbkar (2017) elaboraron té a partir de hojas de café. Para ello se secaron las hojas de café a  $100 \pm 10^\circ\text{C}$  hasta que estuvieran secas y crujientes. La infusión se preparó dejando en remojo en agua caliente durante

5 minutos las hojas secas y molidas, las cuales mostraron contenidos de cafeína entre 1,8 y  $3,2 \text{ mg g}^{-1}$ , galato de epigalocatequina entre 5,5 y  $16,4 \text{ mg g}^{-1}$ , galato de epicatequina entre 0,26 y  $0,48 \text{ mg g}^{-1}$ , epicatequina entre 0,27 y  $0,40 \text{ mg g}^{-1}$  y catequina entre 0,05 y  $0,18 \text{ mg g}^{-1}$ .

Novita et al. (2018) reportan la elaboración de un té de hierbas elaborado con hojas de café que tiene un aroma, sabor y apariencia similar al café.

### Té de granos de café verde.

Macheiner et al. (2019), reportan la preparación de infusiones a partir de granos de café almendra (Figura 42) y las califican como un alimento novedoso y emergente. Se determinaron contenidos de cafeína entre 113 y  $188 \text{ mg L}^{-1}$  y de ácido clorogénico entre 628 y  $1.040 \text{ mg L}^{-1}$  en las infusiones preparadas con almendras sin tostar de *Coffea arabica*.



Figura 41. Aspecto del té de pulpa de café.

## Mermeladas de pulpa de café.

Madrigal & Chavarria (2020) reportan la elaboración de una mermelada utilizando pulpa de café fresca, manzanas (500 g kg<sup>-1</sup> de pulpa), pectina (6 g kg<sup>-1</sup> de pulpa) y azúcar (1 kg kg<sup>-1</sup> de pulpa), la cual tuvo un grado de aceptación del 69% por parte de un panel constituido por 100 evaluadores.

Velsid (2006), citado por Ortiz & Yate (2020), reporta que la mermelada de pulpa de café presenta un sabor dulce, intenso, con pequeños destellos amargos gracias al café y un aroma exquisito.

## Producción de vino a partir de la pulpa y el mucílago de café.

Generalmente se denomina vino a la bebida preparada por fermentación alcohólica del jugo de uvas frescas. Por analogía, se llaman vinos a los productos obtenidos por fermentación de jugos de frutas distintas a la uva.

Giraldo (1999) en Cenicafé, estandarizó una metodología para la fermentación vinica de

los subproductos del café (pulpa y mucílago), obtenidos del proceso de beneficio ecológico del fruto. Los subproductos se sometieron a fermentación, con el fin de determinar la factibilidad de obtener un producto que cumpliera con los requisitos de calidad fisicoquímica y organoléptica establecidos por el ICONTEC (NTC No. 708) para vinos de frutas. El producto obtenido de mucílago fue el que más se asemejó a la muestra patrón (uva). Según la determinación de azúcares totales, los productos se clasificaron como vinos secos sin contenidos de metanol, con aroma característico a alcohol. El mayor rendimiento se presentó para los vinos provenientes de la pulpa de café. Es factible la producción de vino a partir de la pulpa y el mucílago, siendo recomendable realizar estudios posteriores sobre añejamiento y refinación del producto para darle mayor valor comercial.

## • Biocombustibles

Se conoce con el nombre de "biocombustible" a cualquier combustible que se genere a partir de la biomasa. El término combustible abarca a todos los materiales capaces de liberar energía cuando son sometidos a un proceso de combustión (quema), cambiando su estructura química. Los materiales combustibles pueden estar en los tres estados de la materia: sólido (como el carbón, la leña), líquidos (gasolina, alcohol, diesel), gaseosos (metano, propano, butano). El término biomasa se aplica para designar la materia orgánica originada en un proceso biológico. Las plantas transforman la energía del sol en energía química a través del proceso fotosintético. La energía química de la biomasa puede recuperarse quemándola directamente o transformándola en combustibles líquidos o gaseosos que reciben el nombre de biocombustibles y se diferencian de los combustibles fósiles por el hecho de provenir de materia orgánica no mineralizada.



**Figura 42.** Aspecto del té de granos de café almendra sin tostar.

Los biocombustibles son combustibles derivados de fuentes renovables, es decir, aquellas que son capaces de regenerarse por medios naturales y se consideran inagotables. Los residuos agrícolas lignocelulósicos, como es el caso de los subproductos sólidos del cultivo e industrialización del café, pueden utilizarse directamente como combustibles o transformarse en biocombustibles como el bioetanol y biogás, a través de procesos de fermentación o en biodiesel mediante procesos de esterificación de sus grasas, en gas de síntesis mediante procesos de gasificación, o en carbón vegetal mediante procesos de pirólisis, todos ellos son considerados energías renovables dado que no se agotarán mientras puedan cultivarse los vegetales que los producen.

La necesidad de los países de aumentar su matriz energética, ha impulsado la investigación y producción de los biocombustibles. Por lo tanto, actualmente se está investigando en la generación de biocombustibles provenientes de biomasa residual o de especies vegetales que no se utilizan para la alimentación humana o animal.

### **Subproductos del proceso de beneficio e industrialización del café, sin transformación, utilizados como combustible**

Los procesos de combustión directa son la forma más simple para extraer la energía de la biomasa y son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente, para la cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas. Además, puede aprovecharse en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad.

Varios de los subproductos del café, por su densidad energética y su contenido de humedad, pueden utilizarse como combustible directo tal y como se generan, como es el caso de la cascarilla, los rípios

y los granos de café de calidad inferior, otros pueden utilizarse como combustible directo después de reducir su contenido de humedad (como es el caso de la pulpa y la borra) y otros subproductos pueden utilizarse como combustible directo después de acondicionar su tamaño de partícula y su contenido de humedad (como es el caso de los tallos de café).

La densidad energética de un combustible es la cantidad de energía contenida en el mismo y puede expresarse como densidad energética volumétrica ( $\text{MJ L}^{-1}$ ) o como densidad energética gravimétrica ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ).

La densidad energética de un combustible también se conoce con el nombre de contenido energético o poder calorífico, el cual expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente. La magnitud del poder calorífico puede variar según como se mida y se utiliza la expresión poder calorífico superior (PCS) o poder calorífico bruto para designar la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de un kilogramo de combustible cuando el vapor de agua originado está condensado y se contabiliza, por consiguiente, el calor desprendido en este cambio de fase y se utiliza la expresión poder calorífico inferior (PCI) o poder calorífico neto para designar la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de un kilogramo de combustible, sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua de la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor (Ministerio de Minas y Energía, 2011).

### **Pulpa de café como combustible directo.**

Porres et al. (1987) en Guatemala, reportan un contenido energético de  $15,88 \text{ MJ kg}^{-1}$  para la pulpa de café seca y un consumo en el secado mecánico de la misma de  $36,92 \text{ MJ}$

kg<sup>-1</sup>, con un balance energético negativo en el proceso, debido a que por cada unidad de energía aplicada en el secado de la pulpa sólo se generaron 0,43 unidades en la combustión del producto seco.

### **Cisco de café como combustible directo.**

Roa et al. (1999) reportan un contenido energético de 17,94 MJ kg<sup>-1</sup> de cisco de café. Oliveros et al. (2009), en el secado mecánico del café, reportan un consumo promedio de 4,40 kg de cisco por cada arroba de cps.

### **Borra de café como combustible directo.**

En las fábricas de café soluble la borra de café, después de un proceso de prensado y secado hasta el rango del 8% al 15% de humedad, se utiliza como combustible en las calderas generadoras de vapor de agua. Su densidad energética está entre 24,91 MJ kg<sup>-1</sup> (Silva et al., 1998) y 29,01 MJ kg<sup>-1</sup> de borra seca (Rodríguez & Zambrano, 2010).

### **Tallos de café como combustible directo.**

Romo et al. (2011) reportan una densidad energética de 17,51 MJ kg<sup>-1</sup>, expresada como poder calorífico inferior para los tallos de café, los cuales son utilizados por los productores como combustible directo en fogones a base de leña para la cocción de alimentos. En el secado del grano de café se estima un consumo de 4,50 kg de tallos por cada arroba de cps.

### **Ripios y café deteriorado que no se pueda utilizar para la preparación de la bebida.**

De acuerdo con Brito (1990), los ripios presentan un contenido energético del orden

de 15,59 MJ kg<sup>-1</sup> cuando se utilizan como combustible sólido.

### **Producción de biogás a partir de los subproductos del proceso de beneficio e industrialización del café**

El biogás es una mezcla gaseosa constituida básicamente por metano en una proporción que oscila entre el 50% y el 80% y gas carbónico, con pequeñas trazas de vapor de agua, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, amoníaco, monóxido de carbono, nitrógeno, oxígeno y trazas de compuestos orgánicos (Carrillo, 2004); se origina por la degradación de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas. La composición del biogás depende del material digerido y de las condiciones del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable (MINENERGÍA-PNUD-FAO-GEF, 2011).

El biogás puede utilizarse como combustible directo en sistemas de combustión a gas o para la producción de energía eléctrica, mediante turbinas o plantas generadoras a gas. El metano es el principal componente del biogás y es el compuesto que le confiere las características combustibles al mismo. El contenido energético del biogás con un 60% de metano es de 21,46 MJ Nm<sup>-3</sup> (Sasse, 1984) equivalente a 1,0 L de alcohol carburante, 0,70 L de gasolina, 0,50 Nm<sup>3</sup> de gas natural, 6,0 kWh de energía eléctrica y 1,2 kg de madera de café. En la Tabla 43 se presentan las principales propiedades del biogás.

### **Biogás a partir de pulpa de café.**

En Cenicafé, en los estudios realizados por Calle (1974) y Arcila (1979), se reportan rendimientos de 25 L de biogás por cada kilogramo de pulpa fresca aplicada a la planta de generación de biogás (Figura 43). El contenido energético del biogás, con un 60% de metano, es de 21,46 KJ L<sup>-1</sup> (Sasse, 1984),

por lo que se obtiene un contenido energético en el biogás generado a partir de la pulpa de café de  $0,54 \text{ MJ kg}^{-1}$  de pulpa fresca.

Las plantas para producir biogás con base a los residuos agrícolas consisten básicamente en una cámara cerrada, en donde se almacenan los residuos para su fermentación, un tubo de carga por donde se alimenta la planta y un tubo de salida del biogás. Estas plantas pueden construirse en ladrillo revestido con cemento, en fibrocemento, lámina de hierro, plastilona o materiales similares. Las plantas construidas en metal o a partir de plastilona negra producen mayor cantidad

de biogás por unidad de sustrato, ya que en ellas se aprovecha mejor la energía solar para el calentamiento del material al interior de la planta, lo que estimula el crecimiento de los microorganismos responsables de la fermentación (Calle, 1974).

Jacquet (1990) en Francia, reporta rendimientos promedios de biogás de  $240 \text{ L kg}^{-1}$  de pulpa seca, con contenidos promedio de metano del 65%, equivalentes a una producción de biogás de  $53 \text{ L kg}^{-1}$  de pulpa fresca, lo que representa un contenido energético de  $1,23 \text{ MJ kg}^{-1}$  pulpa fresca.

**Tabla 43.** Principales propiedades del biogás. Fuente: Deublein y Steinhauser (2008), citados por MINENERGÍA-PNUD-FAO-GEF (2011).

Propiedad	Descripción
Composición	55 – 70% metano ( $\text{CH}_4$ ) 30 – 45% dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) Trazas de otros gases
Contenido energético	$6,0 - 6,5 \text{ kWh m}^{-3}$
Equivalente de combustible	$0,60 - 0,65 \text{ L petróleo/m}^3$ de biogás
Límite de explosión	6 - 12% de biogás en el aire
Temperatura de ignición	$650 - 750 \text{ }^\circ\text{C}$ (con el contenido de $\text{CH}_4$ mencionado)
Presión crítica	74 - 88 atmósferas
Temperatura crítica	$-82,5^\circ\text{C}$
Densidad normal	$1,2 \text{ kg m}^{-3}$
Masa molar	$16,043 \text{ kg kmol}^{-1}$



**Figura 43.** Aspecto de un biodigestor operando con pulpa de café.

### **Biogás a partir de mucilago de café.**

En Cenicafé, Rodríguez & Zambrano (2010), para la descomposición anaerobia del mucilago reportan una producción de 519 L de biogás (con un contenido de metano del 65%)/kg DQO removido, equivalentes a 336 L de metano por cada kilogramo de DQO removido en el proceso de fermentación a 36°C. La DQO promedio de un kilogramo de mucilago es de 0,20 kg, por lo que la producción de metano es del orden de 68 L kg<sup>-1</sup> de mucilago, equivalente a 105 L de biogás/kg de mucilago fresco. El metano tiene un contenido energético de 35,78 KJ L<sup>-1</sup> (Sasse, 1984), por lo que puede estimarse que la energía contenida en el biogás generado a partir de la descomposición de un kilogramo de mucilago fresco es del orden de 2,43 MJ.

### **Biogás a partir de borra de café.**

En Israel, Kostenberg et al. (1995) reportan una producción de biogás, con un contenido de metano entre el 52% y 62%, del orden de 250 a 300 L kg<sup>-1</sup> de sólidos volátiles de la borra, los cuales representan el 99,8% de la materia seca. Lo anterior equivale a un contenido energético en el biogás de 5,90 MJ kg<sup>-1</sup> de borra seca.

### **Producción de bioetanol a partir de los subproductos del proceso de beneficio e industrialización del café**

El bioetanol se obtiene por fermentación de medios azucarados hasta lograr un grado alcohólico, después de fermentación, en torno al 10% - 15%, concentrándose por destilación para la obtención del denominado "alcohol hidratado" (4%-5% de agua) o hasta llegar al alcohol absoluto (99,4% de pureza, como mínimo), tras un proceso específico de deshidratación. Esta última calidad es la necesaria si se quiere utilizar el alcohol en mezclas con gasolina, en vehículos convencionales. El etanol se obtiene de

plantas ricas en azúcar como caña en Brasil, remolacha azucarera en Estados Unidos, y granos ricos en almidón como maíz en Estados Unidos y trigo en Europa (Ballesteros, 1998).

Se denomina bioetanol de segunda generación aquel que se produce a partir de residuos agroindustriales, como es el caso de los subproductos del beneficio e industrialización del café, es decir, que no se emplean como materia prima para su obtención, productos que se utilizan directamente en la alimentación humana como es el caso de la caña de azúcar, cereales como el trigo y el maíz, y tubérculos como yuca y papa.

En Cenicafé, Calle (1977) estudió las condiciones para la obtención de alcohol a partir de la pulpa y el mucilago de café, encontrando que de 100 kg de frutos de café se puede obtener un 6% de melaza, por extracción y concentración del jugo de la pulpa y del mucilago, con un contenido del 35% de azúcares totales, y por fermentación alcohólica se pueden obtener, en promedio, 1,2 L de alcohol de 85°GL, equivalentes a 600 L de alcohol anhidro por cada 1.000 arrobas de café pergamino seco (las cuales generan alrededor de 27 t de pulpa y 9 t de mucilago), lo que equivale a rendimientos cercanos a 17 L de alcohol anhidro/tonelada de residuos (Figura 44).

Cabrera et al. (1987), en Guatemala, reportan que pueden obtenerse entre 2,0 a 2,5 g de etanol en 48 horas, cuando la fermentación se realiza a 28°C, a partir de 200 g de frutos frescos de café, equivalente a 600 kg de etanol anhidro por cada 1.000 arrobas de cps y a 760 L/1.000@ de cps.

### **Bioetanol a partir de la pulpa de café.**

En Cenicafé, Rodríguez & Zambrano (2010) en estudios de fermentación alcohólica

utilizando varias cepas de levaduras, reportan un valor promedio de 25,17 mL de etanol anhidro por cada kilogramo de pulpa fresca. El contenido energético del etanol es de  $21,08 \text{ MJ L}^{-1}$  (Fundación Natura & World Wildlife Fund, 2003), por lo que se obtuvo un contenido energético en el biocombustible de  $0,53 \text{ MJ kg}^{-1}$  de pulpa fresca.

Rodríguez (2013) para la fermentación alcohólica de la pulpa de café utilizando diferentes tipos de hidrólisis y levaduras, reporta rendimientos medios del orden de 22,12 mL de etanol/kg de pulpa fresca. La metodología utilizada para la obtención del etanol anhidro se detalla en las Figuras 45, 46 y 47.

A continuación, se describen las etapas involucradas en el proceso.

**Hidrólisis:** la pulpa fresca obtenida del despulpado sin agua de frutos de café (*Coffea arabica*) variedad Castillo® fue sometida a diferentes tipos de hidrólisis (utilizando una relación agua:pulpa de 1,5:1,0). La hidrólisis ácida se realizó con ácido sulfúrico concentrado (8,7 mL/0,5 kg de pulpa), adicionando  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  (11,25 g/0,5 kg de pulpa). Luego se autoclavó a  $121^\circ\text{C}$  durante 20 minutos. La hidrólisis alcalina se realizó con hidróxido de sodio al 32% (10 mL/0,5 kg de pulpa) y 11,25 g  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  /0,5 kg de pulpa. Luego se autoclavó a  $121^\circ\text{C}$  durante 20 minutos. La hidrólisis enzimática se realizó adicionando 0,5 mL de enzimas/0,5 kg de pulpa, a un pH en el rango entre 4,5 y 5,5 y se sometió durante 60 minutos a una temperatura de  $60^\circ\text{C}$  (Rodríguez, 2013).

**Fermentación:** una vez terminada la etapa de hidrólisis se adecuó el pH del mosto obtenido a un valor de  $5,0 \pm 0,5$ , utilizando ácido sulfúrico o hidróxido de sodio, y se adicionaron las cepas de levadura a una temperatura de incubación de  $30^\circ\text{C}$ . El tiempo de fermentación alcohólica se fijó en 15 horas.



Figura 44. Alcohol carburante obtenido de la pulpa y el mucilago de café.

**Destilación simple:** al final del proceso de fermentación, la pulpa se prensó a un valor de 25 kN y el prensado se llevó a un proceso de destilación simple. Con el volumen del destilado y los grados alcohólicos se determinó la cantidad de alcohol obtenido en el proceso de fermentación, por cada kilogramo de pulpa procesada.

**Rectificación del alcohol:** las muestras provenientes de la destilación simple, se unieron por tratamiento, se llevaron a procesos de rectificación utilizando columnas vigreux y posteriormente en una columna empacada con anillos Rashing.

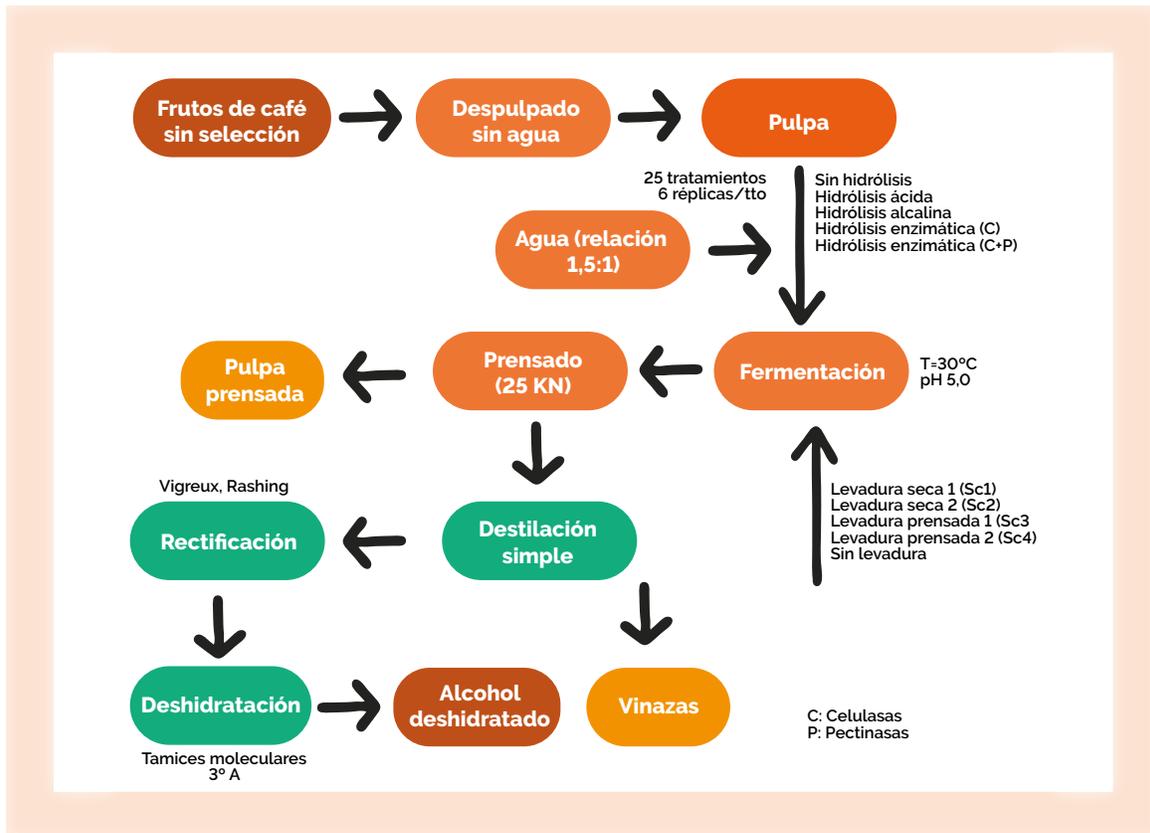


Figura 45. Diagrama de flujo de las etapas utilizadas en la obtención de etanol a partir de pulpa de café (Rodríguez, 2013).

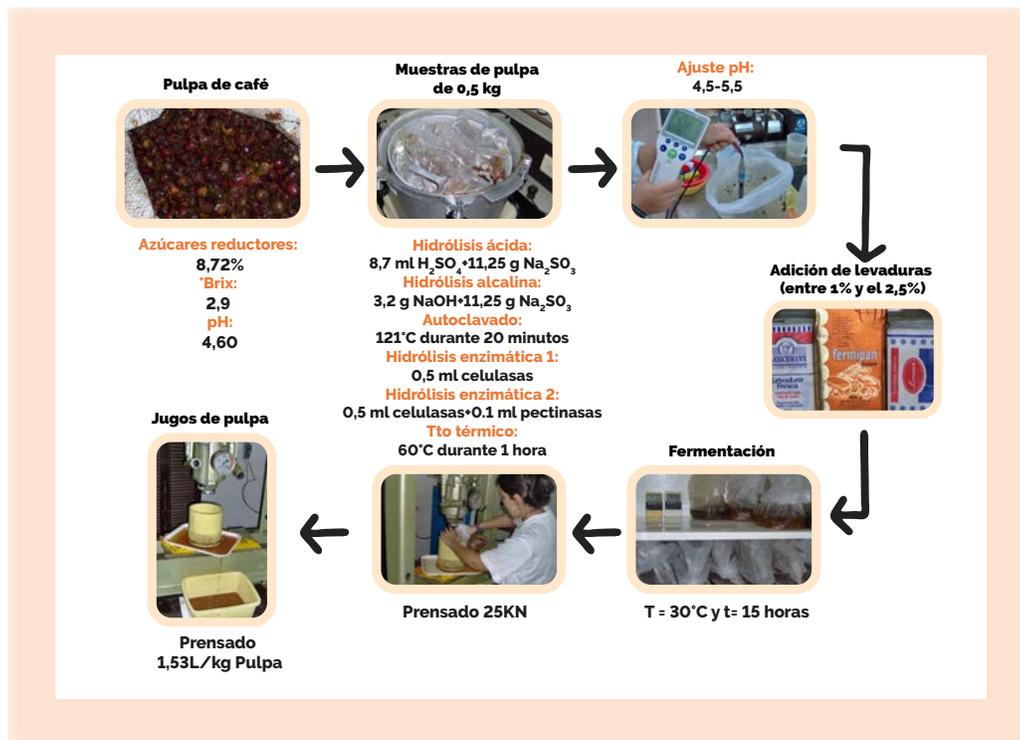
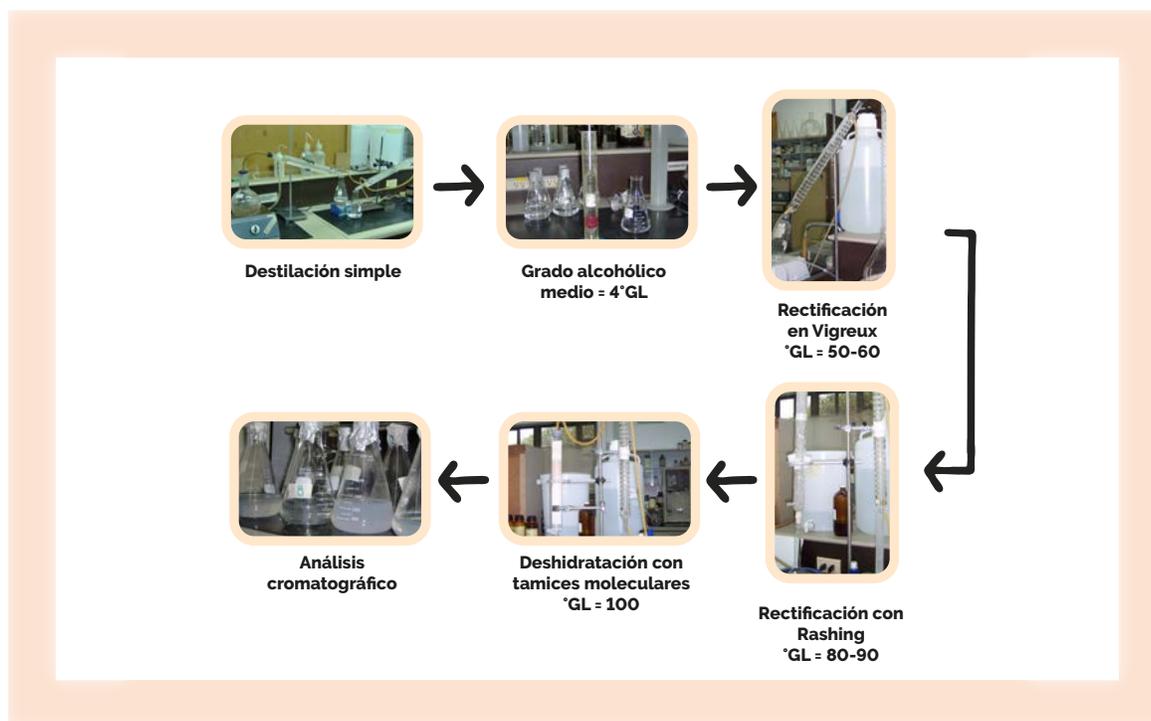


Figura 46. Aspecto de las etapas de hidrólisis y fermentación alcohólica de la pulpa de café (Rodríguez, 2013).



**Figura 47.** Aspecto de las etapas de destilación simple, rectificación y deshidratación del alcohol obtenido de la pulpa de café (Rodríguez, 2013).

**Deshidratación del alcohol:** los destilados de la rectificación se pasaron por tamices moleculares, con un tamaño de  $3\text{Å}$ , dado que el tamaño de la molécula de agua es de  $2,8\text{Å}$  y de la molécula de etanol de  $4,4\text{Å}$  para obtener el alcohol deshidratado.

### Bioetanol a partir del mucilago de café

En estudios de fermentación alcohólica, realizados en Cenicafé, Rodríguez & Zambrano (2010) reportan un valor promedio de  $58,37\text{ mL}$  de etanol obtenido a partir de  $1,0\text{ kg}$  de mucilago fresco, equivalente a  $1,23\text{ MJ kg}^{-1}$  de mucilago, en unidades de energía.

Rodríguez & Zambrano (2011), para la fermentación alcohólica del mucilago de café utilizando diferentes tipos de hidrólisis y levaduras, reportan rendimientos medios del orden de  $57,90\text{ mL}$  de etanol/kg de mucilago fresco.

Krshnamoorthy y Deepak, citados por Cabrera et al. (1987), reportan valores entre  $3\text{ a }4\text{ g}$  de etanol/ $100\text{ mL}$  de mucilago, equivalentes a  $38\text{ a }51\text{ mL}$  de etanol/L de mucilago y  $51\text{ a }69\text{ mL}$  de etanol/kg de mucilago fresco.

De acuerdo con los mejores resultados obtenidos en la fermentación alcohólica de la pulpa ( $25,17\text{ mL kg}^{-1}$  de pulpa fresca) y del mucilago ( $58,37\text{ mL kg}^{-1}$  de mucilago fresco), puede estimarse que por cada  $100\text{ kg}$  de frutos de café se pueden obtener  $1,96\text{ L}$  de alcohol anhidro, equivalente a  $1.200\text{ L}/1.000\text{ @}$  de cps y a  $33\text{ L}$  de alcohol anhidro/tonelada de residuos.

En la Tabla 44 se presenta el potencial de obtención de etanol a partir de la pulpa y el mucilago de café generados por cada millón de sacos de café almendra producido.

## Balance energético de la producción de etanol a partir de la pulpa y el mucílago de café

En la Tabla 45 se presentan los resultados obtenidos del balance energético del proceso de producción de etanol a partir de la pulpa y el mucílago de café. Debido a que el etanol se produce con fines energéticos, se acepta que el balance de energía del proceso total es el que determinará su viabilidad económica.

Se busca que la energía generada por el producto sea mayor que la utilizada en su fabricación, sobre todo cuando esta última es fósil, dado que es la que se busca reemplazar. El balance energético es positivo cuando la relación energía de salida (la generada por el producto) sobre la de entrada (la necesaria para obtener el producto) es mayor que uno.

Para el caso del etanol, la etapa de recuperación del producto (destilación),

**Tabla 44.** Bioetanol obtenido por cada millón de sacos de café almendra producido.

Subproducto	Toneladas generadas	Litros de etanol/ tonelada	Galones de etanol (gal <sub>US</sub> ) <sup>*</sup>
Pulpa fresca	162.900	25,17	1.083.274
Mucílago fresco	55.500	58,37	855.888
Galones de etanol/millón de sacos de café almendra producido			1.939.162

<sup>\*</sup>gal<sub>US</sub> equivale a 3,785 L

**Tabla 45.** Balance energético del bioetanol obtenido de la pulpa y el mucílago del café.

Subproducto	Rendimiento Etanol (L t <sup>-1</sup> de subproducto)	Energía MJ L <sup>-1</sup>				Energía neta producida	E. Generada/E. Consumida	
		Gastada		Producida			Sin aprovechar residuos	Aprovechando residuos
		Agrícola	Industrial	Etanol	Residuo			
Mucílago del desmucilaginado mecánico con 0,6 L de agua/kg cps. (25 L) <sup>*</sup>	40	0,879	25,390	21,080	10,735 V	5,546	0,80	1,21
Mucílago del desmucilaginado mecánico sin agua (17 L)	58	1,700	17,509	21,080	10,735 V	12,606	1,10	1,66
Jugo del prensado a 25KN de la pulpa (21 L)	47	5,802	21,328	21,080	17,297 V	11,247	0,78	1,41
Pulpa café (40 L) (30 kg)	25	5,802	40,624	21,080	21,113 V + 16,200 P	-4,233 y 11,967	0,45	0,91 1,26

Los valores entre paréntesis se refieren al volumen necesario para obtener 1 litro de etanol.

V: Energía adicional proveniente de la fermentación anaeróbica de las vinazas obtenidas.

P: Energía adicional proveniente de la fermentación anaeróbica de la pulpa de café prensada.

es la que exige mayor energía de todo el proceso. Por ello, las mejoras en el proceso de destilación tendrán mayor influencia en el éxito del proceso total que las mejoras en la propia fermentación.

Para el etanol obtenido de los granos de trigo y cebada el balance está alrededor de 0,84, para el sorgo varía entre 1,11 y 1,89, dependiendo si se utilizan los subproductos del proceso, y para los tubérculos como la papa y la yuca está muy cercano al punto de equilibrio energético, entre 0,91 y 1,16. Para el etanol obtenido de caña de azúcar se reportan valores de 1,25 cuando no se utilizan los residuos del proceso en la generación de energía y de 2,42 cuando se utilizan estos residuos (Carrillo, 2004).

Para el caso del mucílago del café, el balance energético estimado es negativo para el mucílago obtenido, utilizando 0,6 L de agua/kg cps (valor de 0,80). Sin embargo, si las vinazas del proceso de destilación se utilizan para la producción de metano, el balance energético se vuelve positivo, pasando de 0,80 a 1,21. Si el mucílago se obtiene sin agua, el balance energético es positivo (1,10), y con el aprovechamiento energético de las vinazas se llega a una relación de 1,66.

En el balance energético se tuvo en cuenta la energía gastada en el proceso de beneficio. Para el caso del mucílago obtenido sin agua la energía demandada se incrementó ya que el consumo del desmucilagador es mayor. Si esta energía no se tiene en cuenta (dado que debe utilizarse necesariamente en el beneficio para obtener el café pergamino seco, (independiente del manejo que se realice a los subproductos), los balances energéticos serían mayores.

Para los jugos de la pulpa se tuvo en cuenta la energía gastada en el proceso de beneficio y de prensado. Para este caso, el balance energético es positivo, sólo si se tiene en cuenta la energía generada en la digestión

anaeróbica de las vinazas, pasando de un valor de 0,78 a 1,41.

La pulpa de café, sin prensar, presenta el balance energético más desfavorable, de 0,45, el cual es muy similar al encontrado en el secado mecánico de la misma (0,43). Si al proceso se le adiciona la energía proveniente de la digestión anaeróbica de las vinazas, alcanza el valor de 0,91, y si se adiciona la energía proveniente de la digestión anaeróbica de la pulpa residual del proceso de fermentación alcohólica, se llega a un balance energético positivo, de 1,26.

### **Bioetanol a partir de la borra de café.**

Agudelo (2002) reporta que pueden obtenerse hasta 27,85 g de etanol a partir de 56,98 g de celulosa proveniente de borra de café deslignificada enzimáticamente, utilizando procesos de sacarificación y fermentación simultánea. Así mismo, reporta un promedio del contenido de celulosa en la borra del 33,62%, lo que permite estimar que se pueden obtener hasta 208 mL de etanol por 1,0 kg de borra seca, equivalentes a un contenido energético de 4,39 MJ kg<sup>-1</sup> de borra seca.

### **Producción de bioetanol a partir de los tallos de café.**

Los materiales leñosos presentan una composición básica de celulosa entre el 40% y el 60%, de hemicelulosa entre el 20% y el 40%, y de lignina entre el 10% y el 25% (Bebilaquia 2009). Es posible obtener bioetanol a partir de las fibras celulósicas de los tallos de café. Castrillón (2018) reporta para el tallo de café un contenido de celulosa del 50%, lo que permite estimar, con base en los resultados obtenidos por Agudelo (2002), que pueden obtenerse hasta 310 mL de etanol por 1,0 kg de tallos de café, equivalentes a un contenido energético de 6,53 MJ kg<sup>-1</sup> de tallos secos.

### **Producción de biodiésel a partir de los subproductos del proceso de beneficio e industrialización del café**

El biodiésel es un combustible que se elabora a partir del proceso de esterificación de aceites de origen animal o vegetal, utilizando metanol o etanol, con el fin de reemplazar el combustible diésel, reduciendo la contaminación atmosférica al generarse menos emisiones de gases en el proceso de combustión (Rodríguez & Zambrano, 2010).

Las materias primas más comunes utilizadas para la fabricación de biodiésel son los aceites de fritura usados y aceites vegetales como girasol, colza, palma y soya, entre otros. A nivel mundial, la producción de biodiésel tiende a provenir mayoritariamente de los aceites extraídos de plantas oleaginosas, especialmente girasol, en España e Italia, colza en países de Centroeuropa (García y García, 2007) y palma en Colombia.

Se denomina biodiésel de segunda generación aquel que se produce a partir de residuos agroindustriales con altos contenidos de grasas, es decir, que no se emplean como materia prima para su obtención, productos que se utilizan directamente en la alimentación humana como es el caso de los aceites de girasol, palma y soya, entre otros.

### **Producción de biodiésel a partir de la borra de café.**

Kondamudi et al. (2008) reportan en el proceso de obtención de aceite a partir de la borra, rendimientos entre el 10% y el 15% en peso, dependiendo de la especie, y una conversión del 100% del aceite en biodiésel, el cual tiene un poder calorífico neto de 38,4 MJ kg<sup>-1</sup> (Oliveira et al., 2008), con lo cual se estima, un contenido energético en el biodiesel obtenido de 4,80 MJ kg<sup>-1</sup> de borra seca, para el promedio.

### **Producción de biodiésel a partir de rípios y café deteriorado que no se pueda utilizar para la preparación de la bebida.**

En Cenicafé, Calle (1977) reporta contenidos entre el 4% y el 17% de aceite, en almendras de diferentes variedades, y rendimientos de aceite, a partir de café de calidad inferior, entre 70 y 150 kg t<sup>-1</sup>. En Brasil, Oliveira et al. (2003) reportan que de cada 100 kg de café defectuoso es posible obtener 12 kg de aceite, de los cuales se obtienen 9 kg de biodiésel. Al considerar que el poder calorífico neto del biodiésel del café es de 38,4 MJ kg<sup>-1</sup>, se estima un contenido energético de 3,46 MJ kg<sup>-1</sup> de café deteriorado.

### **Producción de biohidrógeno a partir de los subproductos del proceso de beneficio e industrialización del café**

El hidrógeno obtenido a partir de los procesos de fermentación de la biomasa se conoce con el nombre de biohidrógeno o hidrógeno verde, por provenir de un recurso renovable. En la actualidad se considera que la producción de biohidrógeno a partir de la biomasa es una tecnología económicamente competitiva, que presenta entre otras, las siguientes ventajas: 1. Independencia de las importaciones de petróleo, 2. El producto permanece dentro del país, 3. El nivel de precios es estable, 4. Aporta al mantenimiento de la paz, y 5. El balance de emisiones de CO<sub>2</sub> se mejora alrededor del 30%. Hay dos tipos de materia prima de biomasa disponibles para la obtención de hidrógeno: 1. Cultivos bioenergéticos dedicados para este fin, como es el caso del sorgo dulce, y 2. Biomasa residual, que es más económica, como los desechos orgánicos de agricultura y procesamiento de madera, los cuales se constituyen en una solución económica y respetuosa con el medio ambiente en el proceso de producción de hidrógeno renovable (Balat & Kirtay, 2010).

Las tecnologías disponibles para la producción de biohidrógeno a partir de la biomasa residual se pueden dividir en dos categorías principales: 1. Rutas termoquímicas y 2. Rutas biológicas. La ruta termoquímica involucra procesos como pirólisis, gasificación, gasificación con vapor, reformado con vapor de bioaceites y gasificación en agua supercrítica. La producción biológica de hidrógeno se puede clasificar en: 1. Biofotólisis del agua utilizando algas verdes y algas verdeazuladas (cianobacterias), 2. Fotofermentación, 3. Fermentación oscura, y 4. Sistema de reactor híbrido. Los procesos biológicos de producción de hidrógeno resultan ser más respetuosos con el medio ambiente y de menor consumo energético en comparación con los procesos termoquímicos (Balat & Kirtay, 2010).

La producción de biohidrógeno como subproducto del metabolismo de los microorganismos es una nueva área de desarrollo tecnológico e involucra una gran variedad de recursos renovables. Hay tres tipos de microorganismos que se utilizan para la producción del biohidrógeno a partir de la biomasa: cianobacterias, bacterias anaerobias y bacterias fermentativas. La producción de hidrógeno por fermentación, a partir de la biomasa residual, es una de las vías que puede contribuir a una economía sostenible del hidrógeno. En teoría, se producen 4 moles de  $H_2$  a partir de 1 mol de glucosa en fermentación acética. Una combinación de fermentación oscura y fotofermentación en un sistema híbrido de dos etapas permite mejorar los rendimientos en la producción de biohidrógeno a partir de biomasa residual. Las bacterias descomponen los carbohidratos o el almidón, presente en la biomasa, a través de la fermentación acética, como el primer paso, y las bacterias fotosintéticas convierten el acetato resultante en hidrógeno en otro reactor como segunda etapa. El rendimiento de hidrógeno se duplica en comparación con el que usa solo la fermentación oscura (Balat & Kirtay, 2010).

### Producción de biohidrógeno a partir de la pulpa de café.

Miñón-Fuentes & Aguilar-Juárez (2019) evaluaron el potencial de producción de hidrógeno a partir de la pulpa de café, reportando rendimientos de 49,2 NmL  $H_2$   $g^{-1}$  DQO inicial, equivalente a 4,18 L  $H_2$   $kg^{-1}$  de pulpa fresca, con una densidad energética de 0,045 MJ  $kg^{-1}$ . La degradación de la DQO referenciada por los autores fue del 13,58%, lo que permite establecer una producción de  $H_2$  del orden de 362,30 NmL  $g^{-1}$  DQO removido, equivalente a 30,78 L  $H_2$   $kg^{-1}$  de pulpa de café fresca. Considerando el poder calorífico inferior del hidrógeno, cuyo valor reportado por Llera & Zabalza (2011) es de 141,86 MJ  $kg^{-1}$ , se puede estimar una densidad energética de 0,39 MJ  $kg^{-1}$  de pulpa fresca en forma de biohidrógeno.

### Producción de biohidrógeno a partir de la pulpa y cascarilla de café.

Villa et al. (2019) evaluaron la obtención de  $H_2$  a partir de residuos de café (pulpa, cascarilla y aguas residuales del procesamiento) pretratados en un reactor hidrotermal aplicando un consorcio de bacterias y hongos (autóctonos de los residuos de café) con actividad hidrolítica y fermentativa. Los autores reportan que la mayor producción de  $H_2$  fue de 82 mL  $L^{-1}d^{-1}$ , alcanzada a 30 °C, 2 g  $L^{-1}$  de pulpa y cascarilla de café, 30 g DQO  $L^{-1}$  de aguas residuales de procesamiento de café y 2 g  $L^{-1}$  de extracto de levadura.

Villa et al. (2020) evaluaron las condiciones de fermentación en la optimización de la producción de  $H_2$  a partir de residuos de café (aguas residuales, pulpa y cascarilla). Los ensayos los realizaron en reactores discontinuos con bioaumentación de un consorcio microbiano constituido por bacterias y hongos, a condiciones de pH entre 4,82 y 8,18, una concentración de pulpa y cascarilla de café entre 6,95 y 17,05 g  $L^{-1}$  y

aguas residuales entre 165,9 y 350 mL con una concentración de 30 g DQO L<sup>-1</sup>. Las mejores condiciones de operación se alcanzaron a pH 7,0 y concentraciones de 7 g L<sup>-1</sup> de pulpa y cascarilla de café y 350 mL de aguas residuales, obteniendo valores de 3,04 L H<sub>2</sub> L<sup>-d</sup>. Los principales metabolitos observados en el proceso productivo fueron ácido butírico (3.838 mg L<sup>-1</sup>), ácido isobutírico (506 mg L<sup>-1</sup>), metanol (226 mg L<sup>-1</sup>) y butanol (156 mg L<sup>-1</sup>). Los mismos autores reportan rendimientos de 98 mL H<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> de pulpa y cascarilla de café, equivalentes a una producción de 23,72 L H<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de pulpa de café fresca. Considerando el poder calorífico inferior del hidrógeno, se puede estimar una densidad energética de 0,30 MJ kg<sup>-1</sup> de pulpa fresca en forma de biohidrógeno.

### **Producción de biohidrógeno a partir del mucilago de café.**

Hernández et al. (2014) evaluaron la producción de H<sub>2</sub> a partir del mucilago de café. Los autores reportan una relación C/N de 53,4 como la apropiada en el proceso de producción y unos rendimientos promedio de 7,6 L de H<sub>2</sub> L<sup>-d</sup> de solución de mucilago a 12.100 mg L<sup>-1</sup>, como DQO. Los autores expresan que el mucilago de café tiene un alto potencial de producción de hidrógeno en comparación con sustratos como los efluentes del beneficio de la palma de aceite y el almidón de trigo. La composición del gas fue de 0,1%, 50,6% y 39,0% de metano, dióxido de carbono e hidrógeno, respectivamente. Las vías de fermentación butírica y acética fueron las rutas principales identificadas durante la producción de hidrógeno. Los datos anteriores permiten estimar una producción del orden de 0,63 L de H<sub>2</sub> g<sup>-d</sup> de DQO removido, equivalente a 67,90 L H<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> mucilago fresco. Considerando el poder calorífico inferior del hidrógeno, se puede estimar una densidad energética de 0,86 MJ kg<sup>-1</sup> de mucilago fresco en forma de biohidrógeno.

Moreno et al. (2019) evaluaron la producción de hidrógeno a partir de mucilago de café combinado con desechos orgánicos (basura del mercado mayorista) en un proceso de fermentación oscura. La suplementación de desechos orgánicos ofreció fuentes apropiadas de carbono y nitrógeno con nutrientes adicionales lo que tuvo un efecto positivo para lograr la producción acumulativa de hidrógeno. Se probaron tres proporciones diferentes de mucilago de café y desechos orgánicos (8:2, 5:5 y 2:8) en biorreactores de 30 L. El mayor volumen acumulado de hidrógeno fue de 25,9 L y se obtuvo para una proporción 8:2 (mucilago de café: desechos orgánicos) después de 72 h, lo que correspondió a 1,3 L de hidrógeno/L de sustrato (0,248 mol de hidrógeno/mol de hexosa). Este trabajo confirma que la reutilización de mucilago de café combinado con desechos orgánicos es práctica para la fermentación de hidrógeno en condiciones anaeróbicas, y estaría influenciada por el consorcio bacteriano involucrado.

Moreno & Zapata-Zapata (2019) evaluaron el efecto de la composición del sustrato, carga orgánica, tiempo medio de acidificación, pH de operación y temperatura sobre la producción de hidrógeno por fermentación anaeróbica con residuos de frutas y verduras y mucilago fresco de café. Para ello, realizaron ensayos en un biorreactor de 20 litros operado en modo discontinuo. Las fermentaciones se realizaron en condiciones mesófilas, sin adición de inóculo y sin esterilizar el sustrato. La máxima producción específica respecto a la carga orgánica fue de 5,5 L H<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> de DQO removido.

### **Producción de biohidrógeno a partir de la película plateada de café.**

Renaudie et al. (2022) evaluaron la producción de hidrógeno mediante fermentación oscura utilizando como materia prima la película plateada del café.

Los ensayos se llevaron a cabo en un reactor de 1 L con la adición de 31 y 62 g DQO L<sup>-1</sup>. El pH se ajustó inicialmente a 7,0 ± 0,2 y se mantuvo por encima de 5,7 durante la fermentación añadiendo automáticamente NaOH 1 M. La temperatura se mantuvo a 37°C. El medio líquido se agitó a 220 rpm. Los autores reportan que la microflora nativa convirtió la materia orgánica en hidrógeno sin pretratamiento de la biomasa, alcanzando rendimientos de hidrógeno de hasta 24,1 mL H<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> de DQO. El acetato fue el principal metabolito producido, mientras que el butirato, el etanol y el propionato se produjeron en menor cantidad. Los datos anteriores permiten estimar una producción del orden de 22,54 L de H<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de película plateada. Considerando el poder calorífico inferior del hidrógeno, se puede estimar una densidad energética de 0,29 MJ kg<sup>-1</sup> de película plateada en forma de biohidrógeno.

### Producción de biohidrógeno a partir de la borra de café.

Petrosyan et al. (2020) evaluaron la producción de hidrógeno a partir de la borra de café reportando rendimientos de 1,28 mL de H<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> de azúcar, equivalentes a 2,75 L de H<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de borra cuando utilizaron como inóculo *Escherichia coli* y de 5,50 L de H<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de borra cuando utilizaron como inóculo un consorcio microbiano. Considerando el poder calorífico inferior del hidrógeno, se puede estimar una densidad energética de 0,07 MJ kg<sup>-1</sup> de borra en forma de biohidrógeno, equivalente a 0,19 MJ kg<sup>-1</sup> de borra seca.

### Producción de carbón vegetal a partir de los subproductos del café.

El carbón obtenido de la madera, también conocido como carbón vegetal, tiene varias ventajas respecto a la madera, en su uso como combustible, tales como: tiene un mayor poder calorífico (similar al del carbón

coque), un mayor porcentaje de carbono, puede transportarse a mayores distancias, manipularse más fácilmente, almacenarse en menor espacio y quemarse con menos desprendimiento de productos volátiles (Bueno, 1987).

La producción de carbón vegetal mediante carbonización, también llamada pirólisis, es la forma más común de la conversión termo-química. La biomasa se quema con una disponibilidad restringida de aire, lo cual impide que la combustión sea completa. El residuo sólido se usa como carbón vegetal (Figura 48), el cual tiene mayor valor energético que la biomasa original, y es ideal para uso doméstico. Usualmente, este carbón es producido de la madera, pero también se usan otras fuentes como cáscara de coco y algunos residuos agrícolas. Los rendimientos de producción del carbón vegetal dependen de la composición de las materias primas utilizadas en el proceso. Existen diferentes tipos de pirólisis en función de las condiciones físicas en las que se realice. Así, factores como la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia y la presión, tienen una influencia muy grande en la distribución de productos que se obtienen (Biomass Users Network, 2002).

### Producción de carbón vegetal de la pulpa de café.

Reynes (1990) reporta en ensayos de carbonización de la pulpa de café, rendimientos entre el 34,2% y 35,8% para temperaturas de carbonización entre 380 y 660°C, con un poder calorífico entre 25,87 y 27,34 MJ kg<sup>-1</sup> pulpa seca y una densidad entre 0,14 y 0,15 kg m<sup>-3</sup>. De acuerdo con lo anterior, puede estimarse un contenido energético de 9,57 MJ en el carbón obtenido de un kilogramo de pulpa seca.

### Producción de carbón vegetal de los tallos de café.

Reynes (1990) reporta para carbón vegetal proveniente de tallos un poder calorífico superior de  $30 \text{ MJ kg}^{-1}$  y rendimientos del proceso de carbonización del 35%, por lo que, para la carbonización de los tallos de café puede estimarse un valor energético de  $10,50 \text{ MJ}$  en el carbón obtenido de un kilogramo de tallos secos.

### Producción de briquetas a partir de los subproductos del café

Las briquetas consisten en bloques sólidos de diferentes formas (cilíndricos, esféricos, elipsoidales rectangulares), que se elaboran de materiales triturados en forma de astillas o polvos, y que se presionan en prensas hidráulicas o mecánicas, a los cuales se les adiciona un aglutinante con el fin de obtener un material compactado para ser utilizado como combustible. La briqueta producida a partir de biomasa vegetal es una fuente



Figura 48. Carbón vegetal de los tallos de café.

de energía que puede obtenerse con baja tecnología y bajo nivel de inversión, que tiene como ventajas un encendido más rápido que la leña tradicional y un mayor poder calorífico que la misma.

### Producción de briquetas de la cascarilla de café.

Manrique (2018) reporta rendimientos del 24% en el proceso de elaboración de briquetas de cisco de café, con contenidos de humedad del 13%, densidad de  $0,69 \text{ kg L}^{-1}$  y densidad energética de  $10,99 \text{ MJ m}^{-3}$ , equivalente a  $15,87 \text{ MJ kg}^{-1}$ , lo que se traduce en un contenido energético de  $3,81 \text{ MJ}$  contenidos en las briquetas obtenidas a partir de un kilogramo de cisco.

### Producción de briquetas de la borra de café.

Balseca-Sampedro et al. (2018) reportan la elaboración de briquetas cilíndricas de  $50 \text{ mm}$  de altura y  $47 \text{ mm}$  de diámetro, a partir de la borra de café, utilizando como aglutinante el almidón de yuca, con una presión de compactación de  $2,77 \text{ MPa}$ , obteniendo un material con una densidad de  $0,46 \text{ kg L}^{-1}$  y un poder calorífico superior de  $17,21 \text{ MJ kg}^{-1}$  de borra seca.

### Producción de astillas a partir de los subproductos del café

El astillado consiste en la molienda de un material aglomerado para obtener un material fragmentado y que tiene forma irregular. Se utiliza con frecuencia para fragmentar los tallos de los árboles y obtener un material más fácil de transportar y de utilizar como combustible directo.

## Producción de astillas a partir de los tallos de café.

En Cenicafé, Tibaduiza (2023), evaluó el funcionamiento de una máquina chipeadora para el astillado de tallos de café frescos, que contenían 42,97% de humedad, provenientes de la etapa de renovación de cafetales mediante zoqueo (Figura 49). Las astillas resultantes se secaron hasta una humedad de 11,58% y se emplearon como combustible directo en un secador mecánico de café. Para un trabajo seguro con la máquina, se determinó que los tallos deben ser previamente acondicionados con herramientas manuales, de tal manera que queden totalmente libres de partes de ramas y no deben superar los 6,0 cm en su diámetro mayor, condiciones que permiten un fácil procesamiento y un buen desempeño de la chipeadora. Para el proceso de astillado, se determinó un rendimiento entre 831 a 1.141 kg h<sup>-1</sup> de astillas y un consumo de gasolina entre 1,8 y 2,4 mL kg<sup>-1</sup> de astillas producidas. Las características y dimensiones de las astillas obtenidas se presentan en la Tabla 46.

Considerando que por cada hectárea de café renovada por zoqueo se generan alrededor de 16 t de tallos secos (30,53 t de tallos frescos) (Farfán, 1994), puede determinarse que su astillado se puede realizar entre 27 y 37 horas, con un consumo de combustible promedio de 64 L de gasolina, equivalente a una energía demandada de 2,0 GJ y siendo la energía contenida en las astillas equivalente a 280 GJ como energía ofertada. Lo anterior indica que la energía necesaria para el astillado de los tallos de café representa el 0,71% de la energía contenida en el producto final.

## Producción de energía eléctrica por la gasificación de los tallos de café

La gasificación es un tipo de pirólisis en la que se utiliza una mayor proporción de

oxígeno a mayores temperaturas que permite optimizar la producción del llamado "gas de síntesis". La gasificación tiene ciertas ventajas con respecto a la biomasa original: el gas producido es más versátil y puede usarse para los mismos propósitos que el gas natural; puede quemarse para producir calor, vapor y alimentar motores de combustión interna y turbinas de gas para generar electricidad; produce un combustible relativamente libre de impurezas y causa menores problemas de contaminación al quemarse (Biomass Users Network, 2002).

La gasificación de la biomasa lignocelulósica es utilizada para la generación de energía térmica, mecánica y eléctrica, de una manera eficiente y sostenible, con menor impacto medioambiental que el producido por los combustibles fósiles. Su desarrollo y utilización ha sido más evidente en tiempos de altos precios del petróleo y, más recientemente, debido a las preocupaciones ambientales (Oliveros et al., 2017).

Mediante la gasificación de la madera del café puede producirse energía térmica con



**Figura 49.** Aspecto del proceso de astillado de los tallos de café.

**Tabla 46.** Características y dimensiones de astillas obtenidas a partir de tallos de café  
Fuente: Adaptado de Tibaduiza, 2023.

Variable	Ancho menor (mm)	Ancho mayor (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)	Peso (g)	Ángulo de corte (°)
Promedio	10,56	13,88	9,21	2,48	0,191	41,90
Máximo	22,91	35,95	16,69	7,57	0,752	76,28
Mínimo	2,46	2,49	4,04	0,36	0,005	14,20
Desviación estándar	4,08	6,06	3,71	1,34	0,19	15,64
Contenido de humedad astilla fresca (b.h)						42,97%
Contenido de humedad astilla seca (b.h)						11,58%
Densidad real astillas secas						590 kg m <sup>-3</sup>
Densidad aparente astillas secas						210 kg m <sup>-3</sup>

(bh): Porcentaje en base húmeda

mayor eficiencia y menor impacto ambiental que con las tecnologías para el secado del café que se encuentran actualmente en uso en Colombia. También puede generarse energía eléctrica en forma sostenible para utilizarla en comunidades rurales que no estén conectadas al sistema nacional interconectado.

La gasificación es un proceso termoquímico en el cual se obtiene gas combustible a partir de oxidación parcial de la biomasa a temperaturas entre 800 y 900°C. El gas obtenido con bajo poder calorífico (4 a 6 MJ Nm<sup>-3</sup>), consta principalmente de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> y fluidos condensables que deben ser retirados mediante procesos físicos y/o químicos para utilizar el gas en motores de combustión interna (Oliveros et al., 2017).

Oliveros et al. (2017), en Cenicafé, evaluaron un equipo de fabricación comercial diseñado para generar electricidad mediante la gasificación de biomasa lignocelulósica, Unidad Generadora de Energía Eléctrica (UGEE), con gasificador de flujo descendente de biomasa y gases y potencia máxima de 20 kW<sub>e</sub>, utilizando astillas de tallos del café (Figura 50). El gas combustible obtenido de la gasificación de los tallos del café (que

tenían una humedad entre el 10% y el 15%), presentó contenidos del 19,0% de CO<sub>2</sub>, 19,9% de H<sub>2</sub>, 3,0% de CH<sub>4</sub>, 10,0% de CO<sub>2</sub>, 0,2% de O<sub>2</sub> y un poder calorífico inferior de 5,67 MJ Nm<sup>-3</sup>. Los mejores resultados en eficiencia térmica (63,8%) y producción de gas (2,48 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> de biomasa) se obtuvieron utilizando astillas de tallos de café del tamaño recomendado por el fabricante y conectando a la UGEE tres motores eléctricos que en total representaron 13,38 kW. Lo anterior representa un contenido energético en el gas obtenido de 14,06 MJ kg<sup>-1</sup> de tallos de café. Los mismos autores reportan consumos de 1,27 kg de tallos de café por cada kWh de electricidad generado, equivalente a una generación de 0,79 kWh kg<sup>-1</sup> de tallos.

### Celdas combustible microbianas con subproductos del café

Una celda combustible microbiana (CCM) convierte la energía química contenida en un material biodegradable directamente en electricidad, lo cual es posible cuando los microorganismos, a través de su metabolismo, transfieren electrones desde un donador, tal como los azúcares reductores, a un aceptor de electrones. La CCM contiene dos electrodos (ánodo y cátodo) que es en donde

transcurren las reacciones electroquímicas y los cuales están separados por un electrolito. Las CCM tienen ventajas sobre otras tecnologías usadas para la generación de energía a partir de la biomasa, tales como: 1. La conversión directa de sustrato a electricidad permite altas eficiencias de generación; 2. Operan eficientemente a temperatura ambiente, incluidas bajas temperaturas; 3. No requieren de energía extra para airear el cátodo, pues este puede ser aireado pasivamente; 4. Tienen aplicación potencial en lugares alejados con ausencia de infraestructura eléctrica, convirtiéndose en una opción de energía renovable para los requerimientos de energía a nivel mundial (Alzate-Gaviria et al., 2008).

Calle (1977), en Cenicafé, reporta que la pulpa y el mucilago de café pueden producir



**Figura 50.** Equipo utilizado en la gasificación de los tallos de café.

electricidad cuando se ponen en contacto con dos metales distintos, dentro de un recipiente aislado, logrando los mejores resultados con cobre y zinc o con hierro y cobre.

Erazo & Agudelo-Escobar (2023), estudiaron el potencial electrogénico y la capacidad de reducción de la materia orgánica por parte de las comunidades microbianas nativas presentes en las aguas residuales del procesamiento húmedo del café utilizando CCM, las cuales operaron durante 21 días tanto en modo de operación de circuito abierto como cerrado. Se analizaron registros de voltaje, determinaciones de corriente y análisis de demanda química de oxígeno (DQO) para establecer la potencia alcanzada en el sistema electroquímico y el grado de descontaminación de las aguas residuales. Durante la operación de las CCM se obtuvieron voltajes entre 200 y 400 mV, valores de intensidad de corriente entre 10 y 22 mA·m<sup>-2</sup>, valores de potencia entre 300 y 900 mW·m<sup>-2</sup> y tasas de degradación entre 500 y 600 mg·DQO L<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>, lo que indica la capacidad metabólica de la comunidad microbiana en las CCM para lograr la descontaminación de las aguas residuales del café y la generación de energía eléctrica.

### Contenido energético de los subproductos generados en el proceso de cultivo e industrialización del café

En la Tabla 47 se presentan los contenidos energéticos de los subproductos generados en el proceso de cultivo e industrialización del café, cuando se utilizan como combustible directo o en los biocombustibles generados a partir de éstos.

## Energía disponible a partir de los subproductos del café generados en la finca

En las fincas cafeteras es posible disponer, para su aprovechamiento energético, de los tallos provenientes del proceso de renovación de los cafetales, así como de la pulpa y el mucilago generados en el proceso de beneficio del fruto.

De acuerdo con los datos de la Tabla 47, la energía disponible (ED) por hectárea en los subproductos generados en la finca, en forma de biogás (pulpa y mucilago) y de energía calórica (combustión de los tallos de café) es:

ED:  $1,23 \text{ MJ kg}^{-1}$  pulpa fresca  $\times 2.600 \text{ kg ha-año}^{-1}$  de pulpa +  $2,43 \text{ MJ kg}^{-1} \times 890 \text{ kg ha-año}^{-1}$  de mucilago +  $17,51 \text{ MJ kg}^{-1} \times 3.200 \text{ kg ha-año}^{-1}$  de tallos = 61.393 MJ

Considerando que el poder calorífico de la gasolina es de  $32 \text{ MJ L}^{-1}$  (Fundación Natura & World Wildlife Fund, 2003), equivalente a 121 MJ/gal<sub>US</sub>, se tendría que la energía disponible

en los subproductos del café generados por una hectárea al año es equivalente a la contenida en 507 gal<sub>US</sub> de gasolina. Energía que por provenir del campo es renovable y tiene un gran valor económico en la actualidad, dada la inestabilidad de los precios de los combustibles provenientes de fuentes fósiles.

## • Carbón activado (biocarbón)

El carbón activado es un adsorbente preparado a partir de materiales carbonosos que se caracteriza por poseer una alta superficie interna, variedad de grupos funcionales y una buena distribución de poros, propiedades que le permiten atrapar una gran diversidad de moléculas. La preparación de este tipo de material se lleva a cabo a través de procesos físicos o químicos, mediante la interacción con gases o la adición de químicos, respectivamente. Los carbones activados

**A partir de la pulpa y el mucilago generados por cada millón se sacos de café almendra producido pueden generarse alrededor de 14,5 millones de metros cúbicos de biogás, equivalente en energía a 335.256 GJ (94 GWh).**

**A partir de la pulpa y el mucilago generados por cada millón se sacos de café almendra producido, pueden generarse alrededor de 7.340 m<sup>3</sup> de bioetanol, equivalente en energía a 154.614 GJ (48 GWh).**

**A partir de los tallos de café provenientes del zoqueo, en una finca de 10 ha sembradas en café y con renovación de 1/5 parte al año, mediante el proceso de gasificación pueden generarse alrededor de 25 MWh.**

**Tabla 47.** Contenidos energéticos de los principales subproductos del café y de los biocombustibles producidos a partir de ellos.

Subproducto	Contenido energético	Producción	Referencia
Pulpa	15,88 MJ kg <sup>-1</sup> pulpa seca Combustible sólido (pulpa seca)	162.900 t*	Porres et al. (1987)
	2,10 MJ kg <sup>-1</sup> pulpa fresca 9,57 MJ kg <sup>-1</sup> pulpa seca Combustible sólido (carbón)		Adaptado de Reynes (1990)
	1,23 MJ kg <sup>-1</sup> pulpa fresca 5,60 MJ kg <sup>-1</sup> pulpa seca Combustible gaseoso (biogás)		Adaptado de Jacquet (1990)
	0,53 MJ kg <sup>-1</sup> pulpa fresca 2,42 MJ kg <sup>-1</sup> pulpa seca Combustible líquido (bioetanol)		Adaptado de Rodríguez & Zambrano (2010)
	Entre 0,30 <sup>1</sup> y 0,39 <sup>2</sup> MJ kg <sup>-1</sup> pulpa fresca Entre 1,37 <sup>1</sup> y 1,78 <sup>2</sup> MJ kg <sup>-1</sup> pulpa seca Combustible gaseoso (biohidrógeno)		<sup>1</sup> Adaptado de Villa et al. (2020) y <sup>2</sup> Adaptado de Miñón-Fuentes & Aguilar-Juárez (2019)
Mucilago	2,43 MJ kg <sup>-1</sup> mucilago fresco 23,13 MJ kg <sup>-1</sup> mucilago seco Combustible gaseoso (biogás)	55.510 t*	Adaptado de Rodríguez & Zambrano, 2010
	1,23 MJ kg <sup>-1</sup> mucilago fresco 11,72 MJ kg <sup>-1</sup> mucilago seco Combustible líquido (bioetanol)		Adaptado de Rodríguez & Zambrano, 2010
	0,86 MJ kg <sup>-1</sup> mucilago fresco 8,19 MJ kg <sup>-1</sup> mucilago seco Combustible gaseoso (biohidrógeno)		Adaptado de Hernández et al. (2014)
Cisco	17,94 MJ/kg <sup>-1</sup> cisco Combustible sólido (cisco)	16.450 t*	Roa et al., 1999
	3,81 MJ kg <sup>-1</sup> cisco Combustible sólido (briqueta)		Adaptado de Manrique, 2018
Borra	29,01 MJ kg <sup>-1</sup> borra seca Combustible sólido (borra seca)	22.300 t/año <sup>1</sup> (Agudelo, 2002)	Rodríguez & Zambrano, 2010
	17,21 MJ kg <sup>-1</sup> borra seca Combustible sólido (briqueta)		Balseca-Sampedro et al., 2018
	5,90 MJ kg <sup>-1</sup> borra seca Combustible gaseoso (biogás)		Adaptado de Kostenberg et al., 1995
	4,39 MJ kg <sup>-1</sup> borra seca Combustible líquido (bioetanol)		Adaptado de Agudelo, 2002
	4,80 MJ kg <sup>-1</sup> borra seca Combustible líquido (biodiésel)		Adaptado de Kondamudi et al., 2008
	0,19 MJ kg <sup>-1</sup> borra seca Combustible gaseoso (biohidrógeno)		Adaptado de Petrosyan et al. (2020)
Ripios	15,59 MJ kg <sup>-1</sup> ripio Combustible sólido (ripios)	-	Brito, 1990
	3,46 MJ kg <sup>-1</sup> ripio Combustible líquido (biodiésel)		Adaptado de Oliveira et al., 2003
Tallos	17,51 MJ kg <sup>-1</sup> tallo seco Combustible sólido (tallo seco)	3.200 kg/ha-año (Rodríguez & Zambrano, 2010)	Romo et al., 2011
	10,50 MJ kg <sup>-1</sup> tallo seco Combustible sólido (carbón)		Adaptado de Reynes, 1990
	6,53 MJ kg <sup>-1</sup> tallo seco Combustible líquido (bioetanol)		Adaptado de Agudelo, 2002
	14,06 MJ kg <sup>-1</sup> tallo (10%-15% de humedad) Combustible gaseoso (Syngas)		Oliveros et al., 2017
	0,79 kWh kg <sup>-1</sup> tallo (10%-15% de humedad) Energía eléctrica		Oliveros et al., 2017

(\*) Cantidad de subproducto fresco generado por cada millón de sacos de café almendra de 60 kg producidos

son utilizados generalmente en procesos de descontaminación de aguas, recuperación de solventes, control de emisiones, decoloración de líquidos, eliminación de olores y soportes catalíticos, entre otros (Rodríguez, 2005, citado por Bastidas et al., 2010).

A pesar de ser un material muy eficiente, el costo del carbón activado a menudo restringe su uso, por lo tanto, hay un interés creciente en la búsqueda de diversas fuentes y alternativas para reducir los costos de producción. Las materias primas utilizadas en la síntesis de carbón activado deben tener un alto contenido de carbono y bajos niveles de compuestos inorgánicos en su estructura, estas dos condiciones las cumplen los residuos sólidos de la agricultura. El carbón obtenido a partir de residuos agroindustriales presenta diversas ventajas en términos de eficiencia y costos si se compara con los mismos materiales a base de carbón de fuentes no renovables (Vidal et al., 2018).

### Carbón activado de pulpa de café.

Grisales & Rojas (2016) reportan la obtención de carbón activado a partir de pulpa de café, mediante activación química, utilizando diferentes tipos de reactivos químicos (NaOH,  $H_3PO_4$ ,  $H_2SO_4$ ), en proporción 1:3, pulpa-reactivo (peso/volumen), sometidas a carbonización a 450°C durante 1 hora, con rendimientos del 6,67 en base húmeda. El carbón activado obtenido presentó porcentajes de adsorción de hasta el 94,1% de colorantes presentes en aguas residuales y un área superficial de 713,80 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>.

Guevara (2019) reporta la obtención de carbón activado a partir de la pulpa de café mediante activación química, utilizando ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) al 80%. El proceso de obtención se realizó secando la pulpa, inicialmente al sol y luego en estufa a 105°C hasta peso constante, moliendo y tamizando el material seco con malla metálica #18 (abertura de 1 mm),

adicionando  $H_3PO_4$  al 80% (en relación 1:1,7 pulpa-ácido en peso-volumen), dejando en reposo durante 24 horas y secando en estufa a 105°C hasta 10% de humedad y continuando con la carbonización a 400°C, por un tiempo de 3 horas, condiciones a las cuales se obtuvo la mayor capacidad de adsorción del carbón (1.838 mg de colorante/g de carbón), el cual presentó valores de 0,445 g cm<sup>-3</sup> para la densidad aparente, 48,05% de materia volátil, 22,48% de cenizas, 29,47% de carbón fijo, 5,90% de humedad y 4,51 de valor de pH.

### Carbón activado de cascarilla de café.

Nabais et al. (2008b) investigaron la elaboración de carbón activado utilizando como materia prima la cascarilla de café (Figura 51) y mediante la inyección de vapor y CO<sub>2</sub>. La cascarilla se carbonizó durante una hora a 600°C (tasa de calentamiento de 10°C/min) y luego se activó con CO<sub>2</sub> (flujo de 85 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>) o vapor (flujo de 85 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>). La activación del carbón por ambos métodos produce carbones activados con pequeñas áreas externas y estructuras microporosas que tienen anchos de poro medios muy similares, principalmente microporos primarios y solo un pequeño volumen de microporos secundarios. La activación con CO<sub>2</sub> conduce a muestras con mayores áreas superficiales y volúmenes de poros en comparación con las muestras producidas por activación con vapor. Se identificó la formación, en la superficie de carbón activado, de varios grupos funcionales, a saber: éter, quinonas, lactonas, cetonas, hidroxilos (libres y fenólicos), pironas y enlaces Si-H. La cascarilla del café tiene un gran potencial para su uso como precursor en la producción de carbones activados por activación con vapor o CO<sub>2</sub> y la reutilización de residuos industriales, como la cascarilla de café, es en la actualidad una de las tareas más importantes para contribuir a la preservación del planeta frente a las actividades humanas.

Nabais et al. (2008a) estudiaron la elaboración de carbón activado a partir de la cascarilla de café, utilizando diferentes métodos de activación. Los autores encontraron que la activación con  $\text{CO}_2$  e hidróxido de potasio produce carbones activados con áreas externas pequeñas y volúmenes de poro de hasta  $0,22$  y  $0,43 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ , respectivamente. Para la activación con  $\text{CO}_2$ , la cascarilla se carbonizó a  $700^\circ\text{C}$  durante 1 hora y para la activación con  $\text{KOH}$  se utilizaron relaciones 1,0:0,5 (cascarilla-KOH p/v) y pirólisis a  $750^\circ\text{C}$  durante 2 horas. Todos los carbones activados producidos fueron de naturaleza muy básica y se obtuvo un área superficial de  $424 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  y  $893 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  para las activaciones con  $\text{CO}_2$  y  $\text{KOH}$ , respectivamente. Se identificaron la formación, en la superficie del carbón, de varios grupos funcionales, a saber: fenol, alcohol, quinona, lactona, pirona y éter, así como grupos Si-H. Es posible incidir sobre la confección de los poros y la estructura química de los carbones activados producidos, seleccionando las condiciones de producción apropiadas.

En otro estudio, Quintana et al. (2008), evaluaron la obtención de carbón activado a partir de cascarilla de café sometida a explosión con vapor. El carbón fue elaborado mediante activación química con  $\text{H}_3\text{PO}_4$  durante 48 horas y un tiempo de carbonización de 3 h. El máximo índice de yodo (el cual se relaciona con la habilidad para adsorber sustancias de tamaño molecular pequeño, tales como olores y sabores) fue 1.005. El pretratamiento con explosión de vapor favoreció la formación de mesoporos. El análisis de área superficial (BET) permitió determinar un área de  $1.263 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ , con un volumen promedio de poros en el carbón obtenido de  $0,54 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ , el cual presentó una mayor capacidad de remoción de  $\text{Ni(II)}$ , seguido de la cascarilla sin pretratamiento y de la cascarilla pretratada. La capacidad de adsorción del carbón activado fue de  $2,5 \text{ mmol Ni(II)/g}$ , valor que duplicó al obtenido con la cascarilla sin pretratamiento. Los autores

concluyen que el carbón activado obtenido a partir de la cascarilla de café activada con ácido fosfórico tiene un gran potencial como adsorbente y presenta características físicas y de adsorción mejores que las obtenidas con este mismo residuo por otros medios de activación.

### Carbón activado de borra de café.

Zungu et al. (2022) elaboraron y caracterizaron el carbón activado proveniente de la borra del café, por considerarla un residuo apropiado y de bajo costo para la elaboración de adsorbentes, para complementar las técnicas de tratamiento convencionales, para la eliminación de contaminantes emergentes. El biocarbón se preparó secando la borra de café, sometiéndola luego a un tratamiento hidrotermal a  $200^\circ\text{C}$  durante 12 horas y finalmente a un proceso de pirólisis a  $800^\circ\text{C}$  durante 90 minutos. El carbón activado obtenido presentó un área superficial de  $232 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  y un volumen promedio de poros de  $0,11 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ , con mayoría de microporos. El ácido salicílico, diclofenaco y cafeína en el biocarbón mostraron capacidades de adsorción de  $40,47 \text{ mg g}^{-1}$ ,  $38,52 \text{ mg g}^{-1}$  y



Figura 51. Carbón activado obtenido de la cascarilla de café

75,46 mg g<sup>-1</sup>, respectivamente. La borra de café tiene potencial para la elaboración de carbón activado, el cual puede desempeñar un papel importante en la mitigación de la contaminación ambiental, al mejorar la eliminación de productos farmacéuticos a partir de efluentes de tratamiento de aguas residuales convencionales, minimizando así su potencial de riesgos en el medio ambiente y en la salud humana.

### Carbón activado de cascarilla y de borra de café usado en la eliminación de metales pesados presentes en el agua.

Carnier et al. (2022) reportan que el biocarbón obtenido de los subproductos del café es un material prometedor para la sorción de metales pesados. Sin embargo, si el uso previsto es la remediación ambiental, es fundamental conocer el grado en que puede ocurrir la desorción y, por lo tanto, evaluaron la eficiencia de los biocarbones obtenidos de la borra y de la cascarilla de café a partir de procesos de pirólisis a 700°C en la sorción de Cd y Pb de soluciones acuosas, en un rango de pH de 2 a 10. La capacidad de sorción de Pb fue de 18,6 mg g<sup>-1</sup> para el biocarbón elaborado a partir de la cascarilla de café y de 11,4 mg g<sup>-1</sup> para el biocarbón elaborado a partir de la borra de café y ambos bio-carbones presentaron bajas capacidades de retención de Cd (1,18 mg g<sup>-1</sup>). Las características de los bio-carbones elaborados a partir de la cascarilla y la borra de café son particularmente importantes para su uso en la remediación ambiental y la producción de biocarbón representa un destino ecológico para estas materias primas, lo que contribuye a la bioeconomía circular.

## • Bioplásticos

Los bioplásticos son aquellos plásticos que son biodegradables y que provienen de

recursos renovables, como el almidón o la celulosa presente en las plantas. Un material biodegradable es considerado así cuando puede ser degradado por microorganismos que generan moléculas más sencillas y asimilables para el ambiente. Los plásticos que no se consideran biodegradables son aquellos elaborados a base de polietileno, polipropileno y policloruro de vinilo, entre otros, ya que los microorganismos no tienen las enzimas necesarias para romper las uniones químicas que los constituyen. Para que un plástico sea considerado como bioplástico debe cumplir tres características principales: ser biocompatible (en lo que se refiere a la compatibilidad orgánica), ser biodegradable (en base a su funcionalidad e interacción con los microorganismos) y ser biogénico (elaborado a través materiales renovables) (Borunda et al., 2021).

Los bioplásticos se clasifican de acuerdo con la materia prima utilizada en su elaboración en: **bioplásticos basados en almidón**, los cuales utilizan como principales fuentes almidón: cereales (maíz, trigo, sorgo, arroz), tubérculos (papa, yuca) y musáceas (plátano, banano); **bioplásticos basados en proteínas**, los cuales utilizan el gluten de trigo, la proteína obtenida de la soya, arroz, huevo y leche, entre otros; **bioplásticos basados en celulosa**, que utilizan la biomasa celulósica (residuos de cultivos, residuos forestales); **bioplásticos basados en ácido láctico**, que utilizan el ácido láctico proveniente de la fermentación de los azúcares presentes en los productos agrícolas o en sus subproductos generados por la hidrólisis del almidón y de la celulosa; **bioplásticos basados en microorganismos y polihidroxicanoatos**, los cuales utilizan el bagazo de caña, cascarilla de arroz, maíz, trigo, café, residuos grasos y residuos lácteos, por fermentación de los mismos. Los bioplásticos actualmente se utilizan en las industrias textiles, empaques rígidos y flexibles, dispositivos electrónicos y en la agricultura. Esto se

debe a que pueden procesarse utilizando las mismas tecnologías (extracción, soplado o inyección) de los termoplásticos convencionales. Los bioplásticos elaborados a base del ácido poliláctico (PLA) (polimerización del ácido láctico), los elaborados a base de polihidroxialcanoatos (PHA's) o los basados en almidón ofrecen propiedades mejoradas como la flexibilidad, durabilidad, imprimibilidad, transparencia, resistencia al calor y brillo. Las materias primas utilizadas para la producción de bioplásticos provienen principalmente de la biomasa residual del sector agrícola, como los residuos ricos en carbohidratos, azúcares y biomasa lignocelulósica (Vargas-García et al., 2021).

### **Bioplásticos a partir de los diferentes subproductos del fruto de café.**

Toala & Sarmiento (2019) estudiaron la elaboración de bolsas biodegradables, aprovechando los residuos de café (grano, pulpa, mucilago y pergamino) y maíz (hojas, semillas, mazorcas y cáscaras). En la elaboración de las láminas biodegradables se utilizó el almidón obtenido de los residuos agrícolas, además de agua, glicerina y vinagre, como materiales plastificantes para la formación del bioplástico. Los autores reportan que los mejores resultados en la elaboración del material plástico se alcanzaron con una mezcla compuesta del 85% de los residuos de maíz y 15% de los residuos de café, con solubilidad de 16%, biodegradación mayor al 70% en seis semanas de monitoreo, elongación del 28,03% y resistencia de 0,66 MPa.

### **Bioplásticos a partir de la pulpa y la cascarilla de café.**

Cedeño & Zambrano (2021) investigaron el aprovechamiento de la celulosa presente en la pulpa y la cascarilla de café para la

elaboración de bioplásticos. La celulosa se extrajo mediante hidrólisis alcalina (utilizando NaOH, con rendimientos promedio del 40,5%) y ácida (utilizando  $H_2SO_4$ , con rendimientos promedio del 36,5%). En la elaboración del plástico se utilizó, además de la celulosa extraída de la pulpa y la cascarilla del café, materiales plastificantes como glicerina, alcohol de polivinilo y alginato de sodio. El bioplástico obtenido a partir de, la hidrólisis alcalina de la pulpa de café, debido a su similitud con polímeros convencionales, presentó los mejores resultados con una humedad del 14,29%, pH de 6,5, espesor de 0,18 mm, densidad de  $1,10 \text{ g cm}^{-3}$  y biodegradabilidad del 7%. Los autores realizaron un estudio de mercado, por medio del cual se conoció la demanda del producto y su aceptación y a través del estudio económico realizado, concluyeron acerca de la rentabilidad positiva del proceso de elaboración de bioplásticos a partir de la pulpa y la cascarilla de café.

### **Bioplásticos a partir de la borra de café.**

Borunda et al. (2021) investigaron la obtención de un bioplástico, con características similares a los plásticos convencionales, a partir de la borra de café. El bioplástico se obtuvo a partir del tratamiento de los residuos de café por medio de una molienda, emblanqueamiento (con cloroformo e hipoclorito de sodio), digestión de Kraft (con sulfúrico sódico e hidróxido de sodio y presión de 1,0 atmósfera), emblanqueamiento de la celulosa obtenida y la posterior formulación del bioplástico. Los resultados mostraron, bajo las diferentes formulaciones estudiadas, que la producción del bioplástico está relacionada con el tiempo y la temperatura durante la digestión Kraft. El bioplástico obtenido a una temperatura de  $150^\circ\text{C}$ , 1,0 atmósfera de presión y reaccionando durante 5 horas presentó las mejores características de textura y firmeza y los mayores rendimientos,

del 25%, en términos de la celulosa obtenida. Se ha demostrado que los bioplásticos con base de celulosa pueden ofrecer propiedades benéficas como: resistencia al agua, resistencias mecánicas como la tensión y el impacto, termo-sellables, laminables, buena imprimibilidad y cierta rigidez, que no les permite ser muy flexibles en comparación a otros plásticos. La extracción de celulosa es primordial para la elaboración del bioplástico a partir de la borra de café y fue posible obtener un bioplástico a partir de la borra de café utilizando una relación 6:1 (sulfuro sódico y el hidróxido de sodio respecto al residuo del café), el cual presentó características similares a los plásticos convencionales, como es su textura y rigidez.

Dado que el material base para la obtención de bioplásticos, a partir de la borra de café, es la celulosa, se reporta la investigación realizada en Cenicafé por García-Muñoz & Riaño-Luna (1999), quienes evaluaron la obtención de celulosa a partir de la borra de café, después de la extracción del colorante contenido en la misma. La digestión de esta materia decolorada produjo pulpas con alto contenido de celulosa que pueden ser utilizadas en la fabricación de papel, en industrias de derivados de celulosa, en la fabricación de bioplásticos, entre otras alternativas. El proceso se optimizó con base en la caracterización inicial de la borra, los rendimientos de extracción, las condiciones de operación del proceso y la calidad de la pulpa, la cual presentó un contenido de 8,72% de lignina, 85,75% de  $\alpha$ -celulosa y 0,44% de sustancias que pudieron extraerse mediante alcohol:benceno. Las condiciones de trabajo fueron: 22% de sulfidez, 9 atmósferas de presión y 3 horas de digestión.

### **Bioplásticos basados en ácido láctico.**

Una de las materias primas utilizadas en la elaboración de los bioplásticos es el ácido poliláctico (PLA) el cual se obtiene por la

polimerización del ácido láctico, que a su vez se obtiene por la fermentación láctica de azúcares realizada por microorganismos, que en su gran mayoría pertenecen al género *Lactobacillus*. El PLA es uno de los materiales con mayor potencial para sustituir a los plásticos convencionales por sus excelentes propiedades físicas y mecánicas, y porque puede procesarse utilizando las maquinarias existentes con solo ajustes menores. El PLA es también un material altamente versátil, que puede elaborarse con distintas formulaciones para satisfacer la mayor parte de las especificaciones de los productos. Por ser biodegradable y reabsorbible el PLA encuentra múltiples aplicaciones en medicina y en industrias como la alimentaria, la textil, de cosméticos y otras (Herryman & Blanco, 2005).

Camacho & Lizarazo (2021) investigaron el proceso de producción de ácido láctico a partir de la pulpa de café. La metodología comprendió varias fases empezando por la adecuación de la materia prima (limpieza-triturado), seguido de fermentación y determinación de condiciones óptimas de trabajo. Se evaluaron los tiempos de fermentación (24, 60 y 96 horas), las concentraciones de 1,0%, 2,5% y 4,0% de inóculo (cepa nativa de *Lactobacillus*) y porcentajes de pulpa de café al 10%, 15% y 20%; obteniendo así las condiciones óptimas para la fermentación a las 60 h, con un inóculo de 2,5% y en una concentración de pulpa de café del 20%, dando como resultado una concentración de ácido láctico de 16,23 mg mL<sup>-1</sup>, siendo este el valor más alto obtenido.

Arias et al. (2009) investigaron la producción de ácido láctico (AL) por hidrólisis y fermentación simultánea de mucilago de café con *Lactobacillus bulgaricus* NRRL-B548, en matraces de 500 mL, conteniendo 400 mL de medio, agitados a 110 rpm. El pH del medio fue controlado manualmente entre 5,6 y 6,0 por adición de NaOH 5M cada 2 horas. La temperatura fue mantenida en

45°C. El volumen de inóculo fue de 10% del volumen de trabajo. Con miras a optimizar la productividad (P) del AL, se ensayaron tres valores de concentración de inóculo (5, 10 y 15 g L<sup>-1</sup>) y tres concentraciones de azúcares reductores totales (ART) (27, 35 y 60 g L<sup>-1</sup>). La mayor concentración final de AL fue 41 g L<sup>-1</sup>, obtenida con un inóculo de 10 g L<sup>-1</sup> y una concentración inicial de ART de 60 g L<sup>-1</sup>. La máxima productividad fue 1,44 g L<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>, a las 25 horas de fermentación, y se obtuvo con un inóculo de 10 g L<sup>-1</sup> y una concentración inicial de ART de 60 g L<sup>-1</sup>. Con estas mismas condiciones se obtuvo la máxima productividad al final del proceso (30 h) de 1,39 g L<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>. El coeficiente de rendimiento máximo (YPS), calculado a las 30 horas de fermentación, fue de 1,67 g g<sup>-1</sup>, correspondiente a un inóculo de 15 g L<sup>-1</sup> y una concentración inicial de ART de 60 g L<sup>-1</sup>.

### Caracterización de los subproductos del café para la obtención de materias primas utilizadas en la elaboración de bioplásticos.

En el Centro de Investigación ATB (Potsdam, Alemania), Venus (2013) caracterizó muestras de pulpa, mucílago, madera y borra de café, suministradas por Cenicafé, para determinar su potencial para la producción de materias primas utilizadas en la elaboración de bioplásticos (almidón, celulosa, azúcares, ácido láctico). Las muestras se liofilizaron en Cenicafé y se enviaron al laboratorio ATB. Los resultados de la caracterización se presentan en la Tabla 48.

Las muestras liofilizadas fueron sometidas a un pretratamiento ácido (utilizando ácido sulfúrico) y termal a 121°C, y luego a una hidrólisis enzimática para la obtención de azúcares, seguidamente, se realizó la inoculación con bacterias lácticas. Para el caso de la pulpa de café, la obtención de ácido láctico fue de 40 g L<sup>-1</sup> a las 30 horas de fermentación, para las muestras con el 15% de madera de café, la obtención de ácido

láctico fue de 56 g L<sup>-1</sup> en 24 horas y para las muestras de mucílago, la obtención de ácido láctico fue de 59 g L<sup>-1</sup> en 24 horas, cuando se utilizaron 15 g L<sup>-1</sup> de extracto de levadura como suplemento.

## • Colorantes

Para que una sustancia sea considerada colorante, además de poseer color o desarrollarlo a través de una reacción química, debe poder transferirlo al medio al cual se aplica; hay sustancias cromógenas específicas para diferentes sustratos. Los colorantes naturales son aquellas sustancias orgánicas e inorgánicas obtenidas de fuentes vegetales, animales o minerales. Aunque están sujetos a los mismos requerimientos de los colorantes sintéticos, la mayoría son certificados permanentes sin restricciones sanitarias para su empleo en alimentos, drogas y cosméticos. Los colorantes naturales han adquirido mayor relevancia, debida principalmente a su probada inocuidad, especialmente en productos de consumo humano: alimentos y formulaciones farmacéuticas y cosméticas (Marcano, 2018).

Entre los colorantes naturales orgánicos hay varios grupos químicos y los más importantes son (Marcano, 2018):

- **Carotenoides.** Colores amarillos a rojos, se encuentran en alfalfa, zanahoria, onoto, pimentón, tomate, café, y en algunos crustáceos y aves. Son los más abundantes y de mayor aplicación en la industria alimentaria humana y animal.
- **Flavonoides.** Colores amarillos y anaranjados. En este grupo se encuentran las antocianinas (colores rojos-azules) que se presentan en manzanas, uvas, café y en ciertas flores. Se usan principalmente en preparaciones acuosas (refrescos, mermeladas).

- **Betalainas.** Colores amarillos muy intensos hasta rojos violáceos, son responsables del color brillante de las flores de los cactus, su principal fuente es la remolacha. Se aprovechan en preparaciones acuosas.
- **Porfirinas.** Colores verde-amarillo, el ejemplo típico es la clorofila, tienen poco valor comercial.
- **Quinonas.** Colores amarillos y rojos, se encuentran tanto en animales como en vegetales.
- **Guanina.** Se utiliza como aditivo de otros colorantes para producir efectos iridiscentes, su color es blanco-perlado y se aísla de las escamas de los peces y del guano de ciertos pájaros.
- **Otros grupos.** Incluyen poliolefinas como la crocetina, componente principal del azafrán, azúcares del color caramelo, fenoles, riboflavina e indigoides, entre otros.

La obtención de cada colorante requiere de un proceso de extracción y purificación particular que depende no solo de la naturaleza química del colorante mismo, sino

además de las características químicas y físicas de la fuente.

### Colorantes de la pulpa de café.

Díaz & Elías (2009) estudiaron el uso de colorantes naturales obtenidos a partir de la pulpa seca de *Coffea arabica*. La extracción de los colorantes se realizó por el método de reflujo utilizando hidróxido de sodio 0,5 N como solvente (relación 1:14, pulpa seca: solución NaOH), durante 2 horas a 70°C, obteniéndose 11,28 mL de extracto/g de pulpa, de un color café-rojizo. De otra parte, se realizó una extracción alcohólica al 70% y una extracción acuosa de la pulpa seca para identificar metabolitos secundarios para flavonoides, taninos y alcaloides, los cuales estuvieron presentes en la pulpa evaluada. Se concluyó que los flavonoides fueron los causantes del color presente en el extracto colorante obtenido. Luego, se comparó el poder de tinción del extracto colorante utilizando diferentes mordientes al 25% (sulfato ferroso, alumbre, sulfato de cobre, cloruro de sodio, cloruro de estaño, ceniza-limón, ácido tánico), en telas de lino, algodón

**Tabla 48.** Caracterización de los subproductos del café para la elaboración de bioplásticos (Venus, 2013).

Muestra	Materia seca (% MS)	Glucosa (% MS)	Fructuosa (% MS)	Disacáridos (% MS)	Almidón (% MS)	Azúcares totales (% MS)	Ntotal (mg kg <sup>-1</sup> )	N-NH (mg kg <sup>-1</sup> )	Ptotal (mg kg <sup>-1</sup> )
Mucilago	86,00	0,00	0,99	0,36	3,76	1,35	27,95	341,3	2.492
Madera	87,70	2,06	2,09	0,33	0,00	4,48	3,36	55,4	668
Pulpa	82,30	3,19	5,58	2,27	6,88	11,0	12,88	81,0	1.280
Borra	96,10	0,00	0,00	0,00	0,56	0,04	14,32	96,2	83,4
Análisis elemental									
Muestra	C (% MS)	N (% MS)	S (% MS)	H (% MS)	Hemicelulosa (% MS)	Celulosa (% MS)	Lignina (% MS)	Fibra cruda (% MS)	
Mucilago	47,6	3,52	0,26	5,92	13,2	17,8	11,8	19,6	
Madera	47,6	0,41	0,15	5,89	41,7	31,02	7,69	34,3	
Pulpa	49,0	1,85	0,20	5,92	10,5	15,8	12,7	15,6	
Borra	61,9	1,69	0,18	7,25	5,5	36,2	24,8	47,8	

(% MS): Porcentaje en base seca

y seda, observando que la tela de algodón retiene mucho más colorante que las telas de lino y seda. Se concluye que el sulfato ferroso, cloruro de estaño, ceniza - limón son los mordientes que mejor realizaron su efecto de fijación en las diferentes telas, luego del proceso de lavado y secado, por lo que se recomienda que el colorante obtenido sea utilizado en la industria textil.

Hartati et al. (2012), reportan que la pulpa de café es un material apropiado para la producción de colorantes alimentarios, como el caso de las antocianinas, las cuales se encuentran en la pulpa de café en valores de hasta 25 mg de antocianinas monoméricas/100 g de pulpa fresca en peso seco. Existen varios métodos para la separación de antocianinas de la pulpa de café, los cuales incluyen extracción con solvente, extracción asistida por microondas, extracción asistida por ultrasonido, extracción con fluido supercrítico y extracción enzimática.

Villalta (2016) estudió la estabilidad de un extracto rojo obtenido de la pulpa de café en su función como ingrediente colorante en alimentos. Para ello, evaluó el comportamiento del color durante el almacenamiento de dos productos a los cuales se les aplicó: yogurt y sirope de fresa, comparando el extracto rojo en polvo obtenido de la pulpa de café con un colorante artificial. Se concluye que existe un efecto positivo en la estabilidad del extracto en polvo obtenido de la pulpa de café ante la presencia de iones calcio. La cinética de la reacción de degradación de las antocianinas totales presente en el extracto mostró vidas medias desde 6 horas a 80°C hasta 53.171 horas (6 años) a temperatura de -20°C.

Camacho & Sánchez (2022), evaluaron la obtención de antocianinas de la pulpa de café, para su aplicación como pigmento/colorante en serigrafía textil. Encontraron que una solución de etanol al 60% p/p en medio acuoso fue la mejor para la recuperación

de antocianinas, con valores promedios de 0,931 mg antocianina/100g pulpa fresca. Las condiciones apropiadas para la extracción de antocianinas de la pulpa de café, para obtener la mayor cantidad de las mismas, se producen cuando el fruto está en estado maduro según la escala de muduración de Cenicafé (Marín-López et al., 2003). La temperatura y tiempo de extracción fueron variables críticas del proceso, que permitieron la estabilidad de la molécula e influyeron directamente en la cantidad de antocianinas recuperadas, siendo la temperatura la de mayor impacto, pues debe mantenerse en valores inferiores a 51°C. Por otra parte, el tiempo de extracción puede aumentarse a más de 4,5 horas para mejorar el rendimiento de la extracción. El pigmento obtenido, para mantener su estabilidad, debe almacenarse a pH de 2, a bajas temperaturas, sin exposición a la luz directa, en lo posible en recipientes tipo ámbar. Finalmente, se evaluó el desempeño del pigmento sobre diferentes tipos de sustratos textiles como algodón, rayón, poliéster y nylon en composición del 100%, identificando que el de mayor afinidad con la tinta fue el rayón, pues presentó solidez del color al lavado y solidez del color al frote húmedo y seco, lo que le da una alta aplicabilidad al colorante obtenido de la pulpa de café en procesos de acabado de textiles.

### Colorantes de la borra de café.

En Cenicafé, García-Muñoz & Riaño-Luna (1998) optimizaron experimentalmente la extracción de un material colorante liposoluble contenido en la borra de café, utilizando cloroformo como solvente. La eficiencia de la extracción fue del 75% para separar el 24% del material colorante contenido en la borra, utilizando una relación de 2,0 L de solvente por cada kilogramo de borra seca, y tiempos de proceso entre 3 y 4 horas. Se realizó una clasificación preliminar del colorante extraído utilizando cromatografía de capa fina y vapor de yodo como revelador. En una primera aproximación, se detectó la

presencia de lípidos en el material colorante, con posibilidad de aplicación en la tinción de pieles, con una buena fijación y en la fabricación de pinturas de aceite.

Cevallos & Guerrero (2017) evaluaron la extracción y caracterización de un colorante de la borra de café, la cual fue secada a 50°C y luego se procedió a su molienda, se lavó la muestra con etanol grado reactivo y cloroformo y luego se secó y se molió. Posteriormente se realizó una extracción sólido-líquido utilizando etanol al 96,8% como solvente y se obtuvo un rendimiento del 10,15% (10,15 g de colorante/100 g de borra seca). El colorante obtenido presentó una tonalidad marrón, un olor característico al café, apariencia homogénea y textura suave, características propias de los colorantes obtenidos de fuentes vegetales, un valor de gravedad específica de 1,379, un valor de pH de 4,68 y una intensidad de color de 0,020, valores similares a los presentados por el color Caramelo Clase I UE E-150, el cual se utiliza en las industrias farmacéutica, cosmética, alimentaria y de pinturas.

## • Materiales de construcción

Actualmente los costos de los materiales de construcción de vivienda son altos, siendo necesario analizar, evaluar y proponer nuevas alternativas de materias primas en la construcción, que permitan cumplir con las normas y especificaciones exigidas de resistencia y seguridad, pero a menores costos. Los residuos de cosechas y de procesos agroindustriales se han venido utilizando en la elaboración de hormigones ligeros como agregados orgánicos, entre los más estudiados están la cascarilla de arroz, las virutas y aserrín de madera, fique, paja llanera y cascarilla o cisco de café (Salazar et al., 1984).

En los años 1969 y 1970, en Cenicafe se realizaron numerosos ensayos para utilizar la pulpa de café y el cisco del café en la fabricación de cartones, baldosas y plásticos; se lograron formulaciones que permiten asegurar que la pulpa, el cisco y los ripios de café pueden utilizarse para la fabricación de cartones, paneles de revestimiento y plásticos (Calle, 1977).

### Materiales de construcción a partir de la pulpa de café.

La pulpa de café seca puede emplearse molida como relleno para baldosas, mezclando 20% de pulpa seca y molida, 65% de cemento y 5% de cloruro de calcio al 70% (Calle, 1977).

A partir de mezclas pulpa-cemento puede fabricarse un material apropiado para paredes y techos de las viviendas. Calle (1977) reporta que se elaboró un cartón de pulpa y cemento, utilizando pulpa ensilada y molida, la cual se mezcló con nitrato férrico. Por cada litro de la mezcla se adicionaron 150 g de cemento y 2 g de cloruro de calcio. El material resultante se vació en moldes, se prensó a 50 t, se dejó fraguar durante 48 horas y se colocó al sol durante 3 horas. Con esta pasta se fabricaron numerosos cartones de 25 cm de lado y 0,5 cm de espesor, con muy buenas características de resistencia, dado que el material obtenido se puede serruchar, clavar, pulir y no es combustible.

### Materiales de construcción a partir del mucilago de café.

Con el fin de elevar la resistencia a la compresión del adobe convencional, Cansino & Olano (2021) evaluaron la incorporación del mucilago de café, con porcentajes de 0%, 12%, 16% y 20% para la fabricación de adobes, con resultados favorables de resistencia a la compresión de 15,55 kg cm<sup>-2</sup>, 20,01 kg cm<sup>-2</sup>, 23,01 kg cm<sup>-2</sup>, 27,97 kg cm<sup>-2</sup>, respectivamente.

La incorporación del mucílago de café en la mezcla para adobes mejora su resistencia a la compresión, superando el mínimo indicado por la normativa vigente ( $10,20 \text{ kg cm}^{-2}$ ) y a mayor porcentaje de mucílago de café aumenta la resistencia a la compresión de los adobes.

### **Materiales de construcción a partir de la cascarilla de café.**

Calle (1977) realizó ensayos para la elaboración de baldosas, mezclando 20% de cisco molido (2 mm de tamaño de partícula), 65% de cemento y 5% de cloruro de calcio al 70%, adicionando el agua necesaria en el proceso. La mezcla húmeda se colocó en moldes de hierro de 20 cm de lado y una pulgada de profundidad (iguales a los empleados para fabricar baldosas), se prensó a 30 t y se dejó secar al aire durante 5 días, obteniendo baldosas muy resistentes. Un incremento en el contenido de cisco en la mezcla afectó adversamente el fraguado y la resistencia de las baldosas.

Salazar et al. (1984) evaluaron la adición de cascarilla de café en la fabricación de hormigones ligeros. Determinaron que la composición química de la cascarilla la hace apropiada para utilizarla como agregado liviano en un hormigón y que, aunque presenta un contenido de carbohidratos muy alto (superior al 20%), que inhibe la reacción del cemento en la mezcla y por consiguiente retarda el fraguado, presentándose éste después de las 72 horas de fundida la mezcla, esta limitante se soluciona mineralizando la cascarilla con cemento. Los autores concluyen que el hormigón ligero con cascarilla de café es un buen aislante térmico ya que los valores obtenidos de conductividad térmica (K) para las diferentes mezclas ensayadas son menores a los que se obtienen para el hormigón con cascarilla de arroz, los hormigones ligeros con agregados minerales y los hormigones celulares (espuma), con

similares o menores pesos unitarios. Además, es similar a la conductividad térmica del asbesto.

En investigaciones sobre el aprovechamiento de la cascarilla de café en la elaboración de materiales de construcción, Sierra et al. (2013) reportan que los bloques de concreto son elementos modulares, premoldeados, diseñados para ser utilizados en los sistemas de mampostería y su fabricación implica el uso de los materiales de construcción como arena, cemento y agua, y que la cascarilla de café en su estado natural o molida se comportó muy similar a la arena fina. Para la fabricación de los bloques de cemento se utilizaron diferentes proporciones de cascarilla de café, cemento y arena, posteriormente se les dio un curado por un período de 7 días y a los 14 días se realizó la prueba a la compresión. Los bloques con cascarilla de café entera son menos costosos que los fabricados con cascarilla de café molida, esto es debido a que cuando las partículas son pequeñas requieren de mayor cantidad de cemento para ser cubiertas, y que la mejor proporción que cumple los estándares de calidad en la elaboración de los bloques fue una parte de cemento, tres partes de arena y tres partes de material cero (árido utilizado en mampostería), con una proporción de cascarilla de café del 10%, dando como resultado de la resistencia a la compresión valores de  $44,20 \text{ kg cm}^{-2}$ , donde la norma para bloque, según la American Society for Testing and Materials (ASTM), establece un rango entre  $35 \text{ kg cm}^{-2}$  y  $55 \text{ kg cm}^{-2}$ .

Zeledón et al. (2017) desarrollaron un método de siembra y trasplante utilizando macetas biodegradables a partir de cascarilla de café. Los experimentos para determinar las propiedades físicas de las macetas biodegradables determinaron que la mejor mezcla incluyó 50% de cascarilla de café, 30% de almidón de maíz y 20% de cal agrícola; la cascarilla de café debe estar triturada y provenir del tamiz #50, dado que

permitió obtener mezclas que fueron las que mejor se moldearon y compactaron en los moldes para hacer macetas y con las que se obtuvo el mejor coeficiente de resistencia por punto de quiebre, en relación a las demás granulometrías experimentadas, con una resistencia de  $2,2 \text{ kg cm}^{-2}$ . La resistencia y viabilidad de compactación obtenida en las macetas elaboradas con las mezclas a base de cascarilla de café proporcionan las características necesarias para que este producto cumpla su función de siembra y trasplante de plántulas de hortalizas.

### **Materiales de construcción a partir de la pulpa y la cascarilla de café.**

Segarra (2020) investigó la utilización de la pulpa y la cascarilla de café como ingredientes en la elaboración de paneles constructivos modulares, considerando el impacto negativo que sobre los recursos naturales ejerce la industria de la construcción, por la explotación intensa de recursos naturales no renovables. La pulpa y cascarilla de café se secan y se muelen para acondicionar su tamaño de partícula a menos de 2 mm, se mezclan con paja de trigo y se agregan materiales estabilizantes y aglomerantes como arcilla, cal y engrudo de almidón de arroz. Los resultados de la investigación demuestran que es posible la elaboración de paneles constructivos modulares a base de fibras vegetales, permitiendo la revalorización de la pulpa y la cascarilla de café y de la paja de trigo, evitando el impacto ambiental negativo por la mala disposición de este tipo de materiales. Los paneles obtenidos (30 x 30 cm y espesor de 1,8 cm), constituidos por 288 g de pulpa y cascarilla de café y 252 g de paja de trigo, mostraron buenas características en términos de propiedades mecánicas y térmicas, con una densidad media de  $757,74 \text{ kg m}^{-3}$ , contenido de humedad del 5,29%, módulo de rotura de  $33,92 \text{ kg cm}^{-2}$  y coeficiente de aislamiento térmico de  $0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$ , variables que

cumplen con los parámetros normativos. Se proponen los paneles constructivos para su aplicación como elemento de revestimiento en muros interiores o tabiquería liviana con características termo acústicas al presentar un bajo coeficiente de conductividad térmica, porosidad y aristas en la textura permitiendo absorber el ruido.

### **Materiales de construcción a partir de la madera de café.**

Mateus et al. (2018) evaluaron una estructura de madera de *Coffea arabica* para construcciones en bahareque, para ello caracterizaron la madera de café (Tabla 49), concluyendo que tiene similitud con la madera de teca y un buen comportamiento a la flexión y una alta elasticidad. En búsqueda de mejorar los muros en las construcciones en bahareque en la comunidad la Virginia de Amoyá, los autores implementaron un entramado con madera de café, guadua y caña brava (*Chusquea* spp.), buscando una mejor adherencia del entramado con la mezcla. Se obtuvieron resultados positivos, lo que permite utilizar la madera de café en combinación con la guadua y la caña brava en la elaboración de los muros que se requieren para usar en el bahareque.

### **Materiales de construcción a partir de la borra de café.**

Botello (2022) investigó el uso de la borra de café seca, mezclada con diferentes aglutinantes (almidón, resinas, cáscaras vegetales secas y molidas, agar, entre otros) para la fabricación de macetas, tazas y cubiertas para libretas. En la Tabla 50 se detallan las proporciones utilizadas de los diferentes materiales que formaron parte de las formulaciones evaluadas y las características del material final obtenido. Se concluye que la borra de café es una materia prima apropiada para la elaboración de macetas, tazas y cubiertas para libretas,

encontrando que los materiales con la mayor resistencia mecánica fueron aquellos en los cuales se mezcló la borra de café seca con almidón de yuca o con cáscaras de papas secas y molidas.

**Tabla 49.** Algunas características de la madera de café y su comparación con la caña brava (Mateus et al., 2018).

Parámetro	Caña brava	Madera de café
Resistencia a la flexión	562,83 kg cm <sup>-2</sup>	137,66 kg cm <sup>-2</sup>
Densidad	0,68 kg L <sup>-1</sup>	0,77 – 0,91 kg L <sup>-1</sup>
Características del color	Marrón amarillento	Ocre claro
Durabilidad	Alta resistencia a hongos e insectos por medio de inmunización	Alta resistencia a las plagas
Humedad al término de secado	12%	10%-15%

**FIGURA 50.** Diferentes formulaciones de borra de café en la elaboración de tazas, macetas y cubiertas para libretas (Adaptado de Botello, 2022).

Ingredientes	Cantidades	Preparación	Material obtenido
<b>Formulación 1</b>			
Borra de café	47,0%	Calentar la resina con el alcohol hasta obtener una mezcla homogénea, agregar la borra, agitar hasta incorporación completa, moldear y presionar para obtener una pieza compacta. Dejar secar	Rígido, permeable, sin elasticidad.
Resina de pino	53,0%		
Alcohol	0,2 L kg <sup>-1</sup>		
<b>Formulación 2</b>			
Borra de café	33,0%	Calentar el agua, disolver el almidón, al espesar el almidón, agregar la borra, agitar hasta incorporación completa, moldear y presionar para obtener una pieza compacta. Dejar secar.	Rígido, resistencia al agua, ligeramente poroso.
Almidón de yuca	67,0%		
Agua	2,2 L kg <sup>-1</sup>		
<b>Formulación 3</b>			
Borra de café	33,0%	Calentar el agua, disolver las cáscaras de papa en polvo, agregar la borra, agitar hasta incorporación completa, moldear y presionar para obtener una pieza compacta. Dejar secar.	Flexible, ligero, sin elasticidad.
Cáscara de papa	67,0%		
Agua	2,0 L kg <sup>-1</sup>		
<b>Formulación 4</b>			
Borra de café	33,0%	Calentar el agua, disolver las cáscaras de plátano en polvo, agregar la borra, agitar hasta incorporación completa, moldear y presionar para obtener una pieza compacta. Dejar secar.	Flexible, frágil, sin elasticidad.
Cáscara de plátano	67,0%		
Agua	2,8 L kg <sup>-1</sup>		
<b>Formulación 5</b>			
Borra de café	60,0%	Calentar el agua, disolver el agar, agregar la borra, agitar hasta incorporación completa, moldear y presionar para obtener una pieza compacta. Dejar secar.	Rígido, liso, sin elasticidad.
Agar	40,0%		
Agua	6,4 L kg <sup>-1</sup>		



## Manejo del agua en el beneficio del café con cero descargas

Una de las tecnologías que tiene la caficultura en Colombia para contribuir a la meta de alcanzar su sostenibilidad ambiental es el beneficio ecológico del café, el cual se define como: *"el conjunto de operaciones realizadas para transformar el fruto de café en café pergamino seco, conservando la calidad exigida por las normas de comercialización, evitando pérdidas del producto y eliminando procesos innecesarios, lográndose además el aprovechamiento de los subproductos, lo cual representa el mayor ingreso económico para el caficultor, y la mínima alteración del agua estrictamente necesaria en el beneficio"* (Roa et al., 1999).

Con la implementación de esta tecnología en las fincas cafeteras se logra no sólo disminuir el consumo de agua, sino también reducir y hasta evitar el impacto ambiental negativo que pueden generar las aguas residuales generadas en el proceso de beneficio. Esto se traduce en un mayor volumen de agua limpia disponible en las microcuencas cafeteras, para sus diferentes usos (doméstico, agrícola, industrial, pecuario, acuícola y recreativo, entre otros), contribuyendo a la gestión integral del recurso hídrico a escala regional y nacional (Rodríguez et al., 2022).

El beneficio ecológico se caracteriza por cumplir dos condiciones fundamentales: 1. El consumo global de agua en la transformación del fruto en café pergamino seco es menor a  $10 \text{ L kg}^{-1}$  de

cps; 2. Se realiza un manejo parcial o total a los subproductos (pulpa y mucilago) generados en el proceso, con la aplicación de buenas prácticas agrícolas (Rodríguez et al., 2015).

Una categoría especial del beneficio ecológico del café es el beneficio ecológico sin vertimientos, que es aquel beneficio en el cual se hace un uso racional del agua y se tratan los subproductos generados (pulpa, mucilago, aguas residuales), de forma que no se generen vertimientos en el proceso. Para ello los lixiviados generados en el proceso de descomposición de la pulpa de café son recirculados permanentemente sobre el material en descomposición, hasta lograr su incorporación completa, y las aguas tratadas provenientes de los sistemas de tratamiento son postratadas en sistemas de filtros verdes impermeabilizados con geomembrana, tipo invernadero, sembrados con pasto vetiver y cuyos drenados son recirculados completamente en el sistema hasta su incorporación completa (Rodríguez et al., 2022).

### Cero vertimientos en el proceso de beneficio del café

Para lograr cero vertimientos en el proceso de beneficio del café, es imprescindible el empleo de buenas prácticas de beneficio como el despulpado sin agua y el transporte de la pulpa y del café despulpado sin el uso de agua. Cumplidas estas recomendaciones, dependiendo de la infraestructura, de las tecnologías de beneficio instaladas en la finca y del costo de su implementación, pueden emplearse solas o combinadas las siguientes prácticas para el manejo de las aguas residuales y de la pulpa (Rodríguez et al., 2021):

1. La mezcla de las aguas residuales provenientes de la tecnología Becolsub o de la tecnología Ecomill® con la pulpa que está en proceso de descomposición en

el procesador y la recirculación completa sobre la pulpa, de los lixiviados generados, hasta su agotamiento, permitiendo el ciclaje de nutrientes y su incorporación en el abono orgánico obtenido. Para este caso, es indispensable que los equipos de desmucilaginado o lavado estén calibrados con los caudales de agua recomendados y que las aguas de lavado de pisos y equipos se direccionen hacia un sistema de filtros verdes. El agua drenada del filtro verde se debe recircular sobre el mismo, hasta su agotamiento.

2. Dado el bajo consumo específico de agua utilizado en la tecnología Becolsub (menos de 2 L kg<sup>-1</sup> cps) y en la tecnología Ecomill® (menos de 1 L kg<sup>-1</sup> cps), y la alta concentración de mucilago fresco y degradado en el agua residual generada, otra opción investigada en Cenicafé es la utilización del secado solar o mecánico para la deshidratación de las aguas mieles, las cuales pueden transformarse en un subproducto con valor agregado que puede ser utilizado como fuente de materia orgánica o nutrientes para los procesos de producción agrícola de la finca cafetera.

3. Para productores que utilicen tanques para la fermentación y el lavado del café con volúmenes de agua inferiores a 5 L kg<sup>-1</sup> cps, se recomienda:

4. Utilizar procesadores de pulpa tipo invernadero y adicionar a la pulpa de café presente en el procesador, materiales con altos contenidos de celulosa y lignina que estén presentes en la finca, que ayuden a la retención de las aguas residuales del lavado, tales como viruta de madera, hojas secas de los cultivos de plátano y café, materiales secos provenientes de la práctica de "limpias" de los cafetales, capacho y tusa de maíz, cascarilla de café, entre otros. Los materiales deben acondicionarse a un tamaño de partícula de 2 cm, para que puedan mezclarse fácilmente con la pulpa de café y para optimizar

su capacidad de retención de las aguas residuales. Sobre esta mezcla se adicionan las aguas residuales del lavado, los drenados generados se recirculan completamente sobre la mezcla, logrando cero descargas y la obtención de abono orgánico.

- En caso de no disponer de material fibroso y seco para adicionar al procesador de pulpa, pueden llevarse a este sólo las dos primeras cabezas de lavado (agua residual generada en los dos primeros enjuagues en el lavado del café en el tanque) para obtener un abono orgánico enriquecido por los nutrientes y microorganismos presentes tanto en la pulpa como en las aguas mieles, y recircular por completo al procesador, los drenados generados. El agua residual del tercero y cuarto enjuague puede tratarse en filtros verdes con recirculación completa, sobre los mismos, de los drenados generados.

4. Productores que tengan instalados sistemas de tratamiento de las aguas residuales del café pueden construir a continuación de la planta de tratamiento, un filtro verde y recircular completamente en este los drenados generados para alcanzar el objetivo de cero vertimientos.

Además de las ventajas ya mencionadas, como la obtención de abonos orgánicos y la preservación de los recursos naturales, la adopción del beneficio ecológico con cero descargas, utilizando procesadores de pulpa tipo invernadero con recirculación completa de sus lixiviados y filtros verdes tipo invernadero con recirculación completa de sus drenados, en el manejo de las aguas residuales del café, tiene un efecto positivo en la rentabilidad del negocio cafetero al no necesitar la caracterización del agua tratada, requisito exigido cuando se realiza el vertido al suelo o a cuerpos de agua superficiales (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo

Territorial [MAVDT], 2010) o cuando se realiza su reúso (Resolución 1256 del 2021) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2021).

### **Procesador de pulpa tipo invernadero para el manejo y cero descargas de las aguas residuales del beneficio del café (Rodríguez et al., 2021)**

Es una construcción sencilla, fabricada en guadua y esterilla, aislada del suelo, techada y con paredes cubiertas en plástico, donde se almacena la pulpa de café, se deshidrata por acción de la energía solar y se hidrata con aguas residuales del café y se transforma la pulpa, sola o mezclada con otros materiales orgánicos disponibles en la finca (acondicionados a un tamaño de partícula similar al de la pulpa de café), en abono orgánico para su posterior utilización en los procesos productivos de la finca. En esta construcción un porcentaje de las aguas residuales del café se evapora, otro queda retenido en la pulpa y los materiales orgánicos empleados y otro porcentaje drena, por lo que es necesario recolectarlo y adicionarlo de nuevo al material orgánico presente en el procesador hasta su agotamiento total.

Se recomienda que el procesador tenga unas columnas en concreto para mayor durabilidad en el tiempo. La pulpa de café debe provenir de un despulpado sin agua, debe transportarse al procesador sin utilización de agua y distribuirla de manera homogénea en toda el área disponible en el primero de los compartimientos del procesador.

Debe calcularse apropiadamente el área y el volumen que debe tener el procesador de pulpa, con base en la producción anual de café.

El piso del procesador se construye preferiblemente en concreto, con una

pendiente del 2% hacia el centro y frente del mismo. La pendiente permite canalizar los lixiviados hacia un drenaje, que los conduce hacia la parte externa para su recolección en un tanque destinado para tal fin.

El suelo del procesador debe impermeabilizarse colocando plástico calibre 7 o superior o geomembrana de 20 mils que evite la infiltración de los lixiviados y colocar encima del suelo un falso piso construido en guadua, latas de guadua o esterilla que permitan el ingreso de aire fresco del ambiente, que contribuye a la deshidratación y descomposición del material orgánico, que facilita el drenaje y la recolección de los lixiviados.

Las paredes del procesador de pulpa deben forrarse en plástico calibre 7 o superior y además debe colocarse un techo en plástico o tejas de zinc, con el fin de generar un efecto invernadero en el interior del procesador, con el cual se facilite el incremento de la temperatura y la deshidratación de la pulpa. En la pared frontal y hacia la parte superior del techo se deja un espacio entre 20 y 30 cm que permita la salida, por convección natural, del aire caliente y saturado de vapores de agua. En uno de los lados debe construirse una puerta que permita el acceso al procesador.

En la Figura 52 se muestra una secuencia de su construcción.

### **Filtros verdes impermeabilizados con geomembrana, tipo invernadero, sembrados con pasto vetiver para el manejo y cero descargas de las aguas residuales del beneficio del café (Rodríguez et al., 2022)**

Los filtros verdes son un sistema de tratamiento natural de agua residual, que trata de maximizar el potencial del suelo y de la vegetación para eliminar los contaminantes presentes en un efluente. Su funcionamiento

se basa en la aplicación de aguas residuales a una superficie con vegetación, ya sea de tipo forestal o de tipo herbáceo, para aprovechar la capacidad del sistema suelo-vegetación-microorganismos para degradar los contaminantes. El efluente, una vez entra en contacto con el suelo, se ve sometido a múltiples procesos, entre los que se destacan procesos de evapotranspiración, filtración, biodegradación, adsorción y captación de nutrientes por parte de la vegetación. Si el sistema ha sido bien diseñado, el agua debe salir con una calidad que cumpla con la normativa del vertido. Si adicionalmente, el efluente tratado es recolectado y recirculado sobre el filtro verde puede lograrse que no se genere vertimiento, lo que se conoce como cero descargas.

Los filtros verdes tienen un gran potencial de aplicación y adopción en la zona cafetera colombiana por ser una tecnología robusta, de bajo costo de implementación, con una vida útil promedio superior a los 20 años, con bajos requerimientos de operación y mantenimiento, y que se integra fácilmente al paisaje cafetero colombiano.

Los filtros verdes con cero descargas se caracterizan por tener los siguientes componentes:

- Una trampa de pulpa que tiene como objetivo retener material sólido (como granos y pulpa) presente en el agua residual de café y que pueden ocasionar taponamiento de la tubería de conducción del agua a la unidad de tratamiento primario.
- Una unidad para el tratamiento primario, que tiene como objetivo eliminar una parte de la contaminación orgánica presente en las aguas residuales del café y disminuir los riesgos de taponamiento en las tuberías de conducción a la unidad de aplicación.
- Una unidad de aplicación del agua pre-tratada, a la cual llegan las aguas



Acondicionar el área.



Impermeabilizar el suelo con plástico o geomembrana y colocar soporte para instalar un falso piso.



Instalar el falso piso en esterilla y con pendiente del 2% para recolectar lixiviados.



Forrar en plástico las paredes del procesador.



Dejar un espacio de ventilación para retirar el vapor de agua y gases de fermentación.



Disponer la pulpa en el procesador, adicionarle las aguas mieles por goteo levantado de la masa, realizarle volteos. Recolectar los lixiviados y adicionarlos de nuevo a la pulpa en el procesador hasta agotamiento de los mismos.

**FIGURA 51.** Secuencia de la construcción de un procesador de pulpa tipo invernadero.

provenientes del tratamiento primario y las aguas que no quedan retenidas o evapotranspiradas en el área con vegetación del filtro verde, con el fin de ser aplicadas nuevamente sobre esta área.

- Un área para el desarrollo de la vegetación, la cual debe estar impermeabilizada con geomembrana y sembrada con pasto vetiver al cuadro cada 30 cm y cuyo objetivo es retener y evapotranspirar el agua residual.
- Una cobertura plástica, tipo invernadero, para impedir el ingreso del agua lluvia y favorecer los procesos de evapotranspiración del agua.
- Un sistema de aplicación del agua residual, levantado 25 cm del suelo, constituido por 4 líneas de tubería de ½" y con orificios de 3/32" separados cada 10 cm y cuyo objetivo es distribuir uniformemente el agua residual en el área cultivada del filtro verde.
- Una unidad de recolección de drenados para recibir el agua no retenida ni evapotranspirada proveniente del área cultivada y que deberá ser conducida hasta la unidad de aplicación para ser incorporada al área cultivada hasta agotamiento total.

Se recomienda que el filtro verde se instale aguas abajo del beneficiadero, con el fin de poder conducir las aguas residuales por gravedad. En la Figura 53 se muestra una secuencia de su construcción y en la Figura 54 una infografía con todos los constituyentes del filtro verde.

Las principales actividades de mantenimiento de los filtros verdes están relacionadas con el corte periódico del pasto vetiver a 50 cm del nivel del suelo, la limpieza de la tubería de riego, la disposición de los lodos generados en las unidades de tratamiento y aplicación y la limpieza de la cobertura plástica.

A través de los resultados obtenidos en las investigaciones realizadas, evaluando la tecnología de filtros verdes para el manejo y tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café, puede concluirse que es una tecnología apropiada para ser implementada en las fincas cafeteras, ya sea para la depuración de las aguas residuales generadas en el proceso de beneficio del café o para alcanzar el objetivo de cero descargas mediante la evapotranspiración total del agua residual (Rodríguez et al., 2022).

En función de los resultados de eliminación de contaminantes, se determinó que la tecnología de filtros verdes es apta para el tratamiento de los diferentes tipos de aguas residuales del café generadas en las fincas cafeteras, como lo son: las aguas - mieles procedentes de la tecnología del tanque tina, los lixiviados provenientes de la mezcla de la pulpa y el mucilago generados en la tecnología Becolsub y las mieles fermentadas provenientes de la tecnología Ecomill®, presentando unos elevados porcentajes de remoción de carga orgánica en términos de demanda química de oxígeno, sólidos totales y sólidos suspendidos totales, que permiten obtener efluentes con las características de calidad exigidas en la Resolución 631 del 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2015), para vertimientos a cuerpos de agua superficiales y en el Decreto 50 del 2018 (MADS, 2018) para vertimientos al suelo.

El pasto vetiver por sus características fisiológicas y ecológicas, así como por su distribución y ambiente, se constituye en una especie vegetal con grandes ventajas para ser sembrado como vegetación en sistemas de filtros verdes con aplicación de aguas residuales del café, dado que soporta amplios rangos de pH, es tolerante a condiciones de estrés hídrico por exceso y por defecto, es tolerante a variaciones climáticas extremas, presenta un alta eficiencia de eliminación



Realizar una excavación de 0,70 m de profundidad, en el área calculada, con una pendiente del 2,0%, hacia el centro y hacia la parte inferior.



Impermeabilizar la excavación con geomembrana.



Colocar un tubo de PVC, en la parte central, con orificios distribuidos a lo largo del mismo para airear y permitir la salida de agua no retenida.



Colocar una capa delgada de gravilla para proteger el tubo de los taponamientos.



Adicionar el suelo extraído manteniendo las capas originales.



Sembrar el pasto vetiver o la herbácea seleccionada.



Conducir el agua pretratada al filtro verde a través de un sistema de riego por goteo, elevado por lo menos 1,5 m del suelo.



Construir una infraestructura tipo invernadero sobre el filtro verde para evitar el ingreso del agua lluvia y favorecer la evaporación del agua.



Recolectar el agua de salida del filtro verde y adicionarla, de nuevo, al mismo hasta agotamiento.

FIGURA 52. Secuencia de la construcción de un filtro verde (Rodríguez et al., 2021).

de nutrientes y metales pesados, crece en un rango amplio de suelos y con diferentes niveles de fertilidad, además de presentar un alto régimen de transpiración y un profundo sistema radicular.

Para la implementación de filtros verdes que permitan alcanzar el objetivo de cero descargas (ZLD) en el manejo y tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café, se requiere que estos sistemas sean



Figura 52. Componentes de la Tecnología de Filtros verdes.

construidos tipo invernadero, con el fin de evitar el ingreso del agua lluvia y favorecer el aumento de la temperatura en su interior para incrementar las tasas de evapotranspiración. De igual manera, el suelo del filtro verde debe estar impermeabilizado con geomembrana para evitar la infiltración del agua residual aplicada y sembrado con pasto vetiver en cuadro, cada 30 cm (tres esquejes por sitio), por ser esta una especie que se adapta a diferentes ofertas ambientales y presentar un alto régimen de transpiración.

Se determinó que la aplicación periódica de las aguas residuales del café sobre filtros verdes tipo invernadero, impermeabilizados con geomembrana y sembrados con pasto

vetiver, permite incrementar el valor de los parámetros del suelo: pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, N, K, P, Fe, Mn, Cu, B y S. Para los parámetros Ca y Mg se observó un decremento en sus contenidos en el suelo por el efecto de la aplicación de las aguas residuales del café (Rodríguez et al., 2022).

Si se implementara este tipo de tecnología en todas las fincas cafeteras de Colombia, se evitaría el vertido de carga orgánica por aguas residuales del café, además que permitiría el reciclaje de los nutrimentos de las aguas residuales del café al suelo, para su aprovechamiento en agricultura, que sería del orden de 1.304 t de N, 91 t de P y 1.291 t de K.

Como beneficio adicional se tiene la cosecha del pasto sembrado, alrededor de 8,6 t ha<sup>-1</sup> de materia seca por ciclo de 3 meses que, entre otros usos, puede mezclarse con la pulpa de café para la elaboración de abonos verdes y la aplicación de este en los planes de fertilización de los cultivos de la finca cafetera, permitiendo el reciclaje de los nutrimentos. Para el caso de toda la caficultura se estima que el área necesaria de filtros verdes para el manejo de las aguas residuales provenientes de un beneficio ecológico, en el cual se utilizan menos de 10 L de agua kg<sup>-1</sup> de cps sería del orden de 882 ha que producirían alrededor de 30.341 toneladas secas de pasto vetiver al año. En la Tabla 51 se presenta un

resumen del análisis foliar realizado al pasto vetiver cosechado de fitros verdes regados con aguas residuales del café.

Los contenidos de N, P, K, en el pasto vetiver son muy similares a los encontrados en la pulpa de café, que en promedio presenta valores de N de 1,48% vs 1,42% en el pasto vetiver, de P de 0,18% vs 0,14% en el pasto vetiver y de K de 2,40% vs 2,47% en el pasto vetiver. La cantidad de N, P, K contenida en el pasto vetiver cosechado de los filtros verdes, para ser utilizada en la producción de abono orgánico, si se implementara en toda la caficultura de Colombia, sería del orden de 431, 42 y 749 toneladas respectivamente.

**FIGURA 53.** Resultados del análisis foliar del pasto vetiver regado con aguas residuales del café (Adaptado de Rodríguez et al., 2022).

Tipo de agua	Parámetro										
	Cenizas (%)	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B
		%					(mg kg <sup>-1</sup> )				
Proveniente de la tecnología del tanque tina	9,62	1,36	0,12	2,23	0,32	0,12	480,19	140,29	17,57	9,67	9,14
Proveniente de los lixiviados de la Tecnología Becolsub	10,77	1,45	0,14	2,68	0,38	0,14	583,83	187,67	24,75	11,92	13,92
Proveniente de las mieles de la Tecnología Ecomill®	11,27	1,45	0,15	2,51	0,44	0,15	804,58	165,75	31,58	14,00	12,33
Promedio	10,55	1,42	0,14	2,47	0,38	0,13	622,87	164,57	24,63	11,86	11,80

(%): Porcentaje en base seca





## Modelo integrado de manejo y aprovechamiento de los subproductos del café con la aplicación de los conceptos de la bioeconomía circular y biorrefinería

En el pasado, los subproductos del café estuvieron en desventaja para su aprovechamiento, tanto a nivel de finca como a nivel industrial, principalmente por el alto consumo de agua en el proceso de beneficio (que lixiviaba los nutrientes en la pulpa y diluía el contenido de azúcares en el mucílago de café), su baja producción por hectárea, las pocas alternativas para su valorización y los precios moderados de los productos que podrían reemplazar. En la actualidad, la eliminación del agua durante el despulpado y transporte de la pulpa hasta el procesador para su manejo, el incremento de productividad por hectárea, el desmucilaginado mecánico, las centrales de beneficio y el alto costo de los fertilizantes químicos, de los alimentos para consumo animal, y de los combustibles fósiles, favorecen la utilización integral de los subproductos del café con el objetivo de obtener productos de valor agregado (alimentos,

biocombustibles, bioabonos, entre otros) a la vez que se contribuye a proteger el medio natural, alcanzándose el objetivo de lograr beneficios para los productores de café y beneficios para el medio ambiente.

La bioeconomía circular es un esquema innovador, basado en la investigación, destinado a aumentar la utilización y la gestión completa de los recursos biológicos en una ruta de biorrefinería sostenible, que se logra mediante enfoques en cascada para obtener muchos bioproductos a partir de la biomasa residual y que implica la conversión de los flujos de residuos en productos de valor agregado, como concentrados para alimentación animal, bioproductos y bioenergía (Banu et al., 2020).

La biorrefinería es un concepto que se aplica para un conjunto de procesos acoplados que utilizan biomasa como materia prima, siendo análoga a una refinería de petróleo, donde se pueden obtener muchos productos y que integra tecnologías y rutas de transformación para producir, entre otros, alimentos, biocombustibles y productos químicos, siendo identificada como una alternativa promisoría para generar una industria basada en la biomasa y un sistema dinámico debido a la amplia variedad de materias primas que utiliza (Aristizábal-Marulanda et al., 2014).

Apoyados en los conceptos de la bioeconomía circular que propende por la conservación del medio ambiente mediante la prevención de la contaminación y la generación de prosperidad económica y los conceptos de biorrefinería, entendida como una estructura que integra procesos de conversión de biomasa y equipos para producir alimentos, combustibles y productos químicos, en la cual se aprovechan los diferentes componentes de la biomasa para producir diferentes productos de valor agregado, se describen a continuación algunos modelos de aprovechamiento de los subproductos del proceso de cosecha,

beneficio e industrialización del café, de varios que podrían proponerse en el marco de una bioeconomía circular, en la cual los residuos de los diferentes procesos de producción tendrán una aplicación para la elaboración de nuevos productos.

### **Modelo integral de aprovechamiento de la pulpa del café para la producción de energía, alimentos para consumo humano y animal y abonos orgánicos**

Este modelo involucra la utilización de la pulpa de café para la producción de etanol (25,75 L de alcohol t<sup>-1</sup> de pulpa fresca), la utilización de la pulpa residual generada en el proceso productivo del biocombustible para el cultivo de hongos comestibles (100 kg de hongos t<sup>-1</sup> de pulpa residual), la utilización del sustrato residual del cultivo de los hongos para la producción de abono orgánico (150 kg de lombricompost fresco y 4,5 kg de biomasa de lombriz t<sup>-1</sup> de pulpa residual) y las vinazas del proceso de destilación utilizado en la obtención del bioetanol para la producción de biogás.

De esta forma, a partir de la pulpa del café puede generarse energía renovable (bioetanol y biogás), alimentos para consumo humano (hongos), alimento para consumo animal (lombrices) y abono orgánico en forma secuencial y en armonía con el ecosistema cafetero.

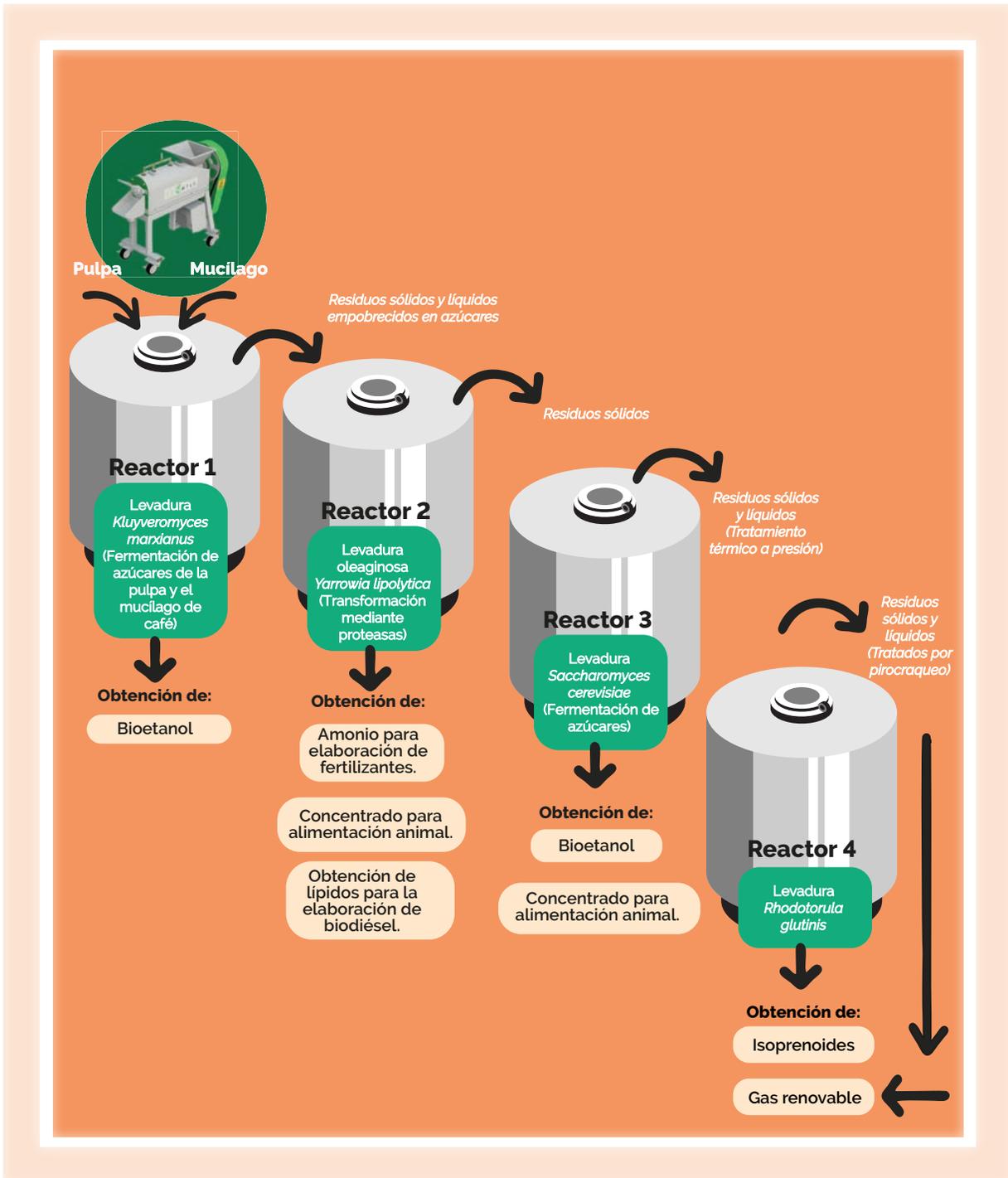
### **Modelo integral de aprovechamiento de la pulpa y el mucilago del café para la producción de energía, fertilizantes y alimentos para consumo animal**

Hughes et al. (2014) proponen el aprovechamiento de la pulpa y el mucilago de café en múltiples etapas (Figura 55) para

obtener biocombustibles y bioproductos utilizando tecnologías de conversión bioquímica y termoquímica. La etapa inicial de bioconversión utiliza una cepa de la levadura *Kluyveromyces marxianus* para producir bioetanol a partir de azúcares contenidos en la pulpa y el mucílago de café. Los sólidos empobrecidos en azúcar resultantes (principalmente proteínas) pueden ser utilizados en una segunda etapa por la levadura oleaginosa *Yarrowia lipolytica* para producir amoníaco de base biológica para fertilizante y son degradados aún más por las proteasas de *Y. lipolytica* a péptidos y aminoácidos libres para la obtención de concentrados para alimentación animal y también se obtienen lípidos que pueden ser transformados en ésteres metílicos para la producción de biodiésel. La fracción lignocelulósica resultante de la segunda etapa se puede moler y tratar para liberar

azúcares y ser utilizados en una tercera etapa mediante la levadura *Saccharomyces cerevisiae* para la producción de bioetanol y biomasa celular para la alimentación animal. La proteína residual y los sólidos de lignina resultantes de la tercera etapa se pueden cocer a presión y pasar a un fermentador en una cuarta etapa donde la levadura *Rhodotorula glutinis* convierte el metano en isoprenoides intermedios. Los residuos se pueden combinar y transferir a reacciones de pirocraqueo e hidroformilación para convertir amoníaco, proteínas, isoprenos, ligninas y aceites en gas renovable.

De esta forma, a partir de la pulpa y el mucílago de café puede generarse energía renovable (bioetanol, biodiesel y biogás), alimentos para consumo animal (concentrados y levaduras) y fertilizantes (amoníaco) en forma secuencial y en armonía con el ecosistema cafetero.



**FIGURA 54.** Biorrefinería para la obtención de energía, fertilizantes y alimentos a partir de la pulpa y el mucilago de café. Adaptado de Hughes et al. (2014).

## Modelo integral de aprovechamiento de los tallos de café provenientes del proceso de renovación por zoca para la producción de bioenergía

Aristizábal-Marulanda et al. (2021) proponen el aprovechamiento de los tallos de café, provenientes del proceso de renovación por zoca, a través de la producción de bioetanol, electricidad y vapor de baja presión.

La producción de bioetanol se compone de cuatro subsistemas: etapa de pretratamiento, hidrólisis enzimática, fermentación con *Zymomonas mobilis* y purificación. En la etapa de pretratamiento, los tallos de café se muelen hasta un tamaño de partícula de 0,4 mm y luego se mezclan con ácido sulfúrico al 2% (v/v) durante 3h a 115°C. Al final del pretratamiento, las fracciones sólida y líquida se separan por filtración y se realiza la hidrólisis enzimática de la fracción sólida con enzimas celulolíticas. Al final de la hidrólisis enzimática, las fracciones sólida y líquida (con altos contenidos en xilosa y glucosa) se separan por filtración. Las fracciones ricas en xilosa y glucosa se mezclan y se fermentan con *Z. mobilis* durante 80h a 33°C. La etapa de purificación del etanol se realiza en dos columnas de destilación donde inicialmente se concentra el etanol hasta 45–50% p/p, luego hasta el azeótropo (96% p/p) y finalmente hasta deshidratación (tamices moleculares) para la obtención de etanol al 99,6% p/p. Para este proceso productivo se estima un impacto de gases efecto invernadero (GEI) de 0,0784 kg CO<sub>2</sub> eq. por cada MJ de etanol.

La tecnología utilizada en el proceso de cogeneración, a partir de los tallos de café, se compone de tres subsistemas: gasificación, generador de electricidad y generador de vapor. El subsistema de gasificación implica un proceso de astillado y la gasificación propiamente dicha. Los tallos de café son astillados (tamaño de partícula entre 5 y 10 mm) y las astillas se transportan al gasificador

donde se produce, como producto principal, gas de síntesis (syngas). El proceso de gasificación se divide en tres zonas de reacción: pirólisis, oxidación, y reducción. Luego, una turbina de gas utiliza los productos de la combustión del gas de síntesis para producir energía. El ciclo está compuesto por dos compresores, una cámara de combustión, y dos turbinas. La combustión del gas de síntesis se lleva a cabo en una atmósfera con suficiente aire para lograr una combustión completa. Los gases de salida de la turbina de gas se llevan a un generador de vapor para producir vapor de baja calidad. Para este proceso productivo se estima un impacto de gases efecto invernadero (GEI) de -0,0054 kg CO<sub>2</sub> eq. por cada MJ de electricidad.

## Modelo integral de aprovechamiento de la borra de café para la producción de biocombustibles, biopolímeros, antioxidantes y biocompuestos

Los principios de la bioeconomía circular se aplican para desarrollar una biorrefinería sostenible basada en la valorización de la borra de café. Karne (2018) propone el aprovechamiento de la borra de café para la producción de biocombustibles, biopolímeros, antioxidantes y biocompuestos. La borra de café está compuesta de lípidos, carbohidratos, compuestos que contienen carbono y nitrógeno, entre otros. Usando n-hexano y una mezcla de n-hexano/isopropanol, se logra el mayor rendimiento de producción de aceite durante la extracción soxhlet a partir de la borra de café. Alternativamente, se puede emplear dióxido de carbono supercrítico como solvente verde para la extracción del aceite. Utilizando métodos químicos y biotecnológicos avanzados, se puede aprovechar la borra de café para la producción de varios biocombustibles, como biodiésel, bioetanol, bioaceite, biocarbón y biogás. La transesterificación *in situ* de la borra de café permite obtener un rendimiento

de biodiésel del 80 al 83%. Además, una gran cantidad y variedad de productos de valor agregado se pueden obtener de la borra de café, a saber: polihidroxialcanoatos (biopolímeros), biosorbentes, carbón activado, polyol (alcoholes), espuma de poliuretano, carotenoides, antioxidantes fenólicos y compuestos verdes.

### **Modelo integral de diversificación de la matriz energética a partir del aprovechamiento de los subproductos del café para la producción de bioenergía**

Este modelo integra la producción de energía a partir de la biomasa residual del café, mediante los procesos de conversión más eficientes y que para el caso de los subproductos del café sería la producción de bioetanol a partir de la pulpa y el mucilago de café, la digestión anaeróbica de las vinazas resultantes de este proceso para la generación de biogás; así como la gasificación de los tallos de café para la generación de energía eléctrica y la producción de briquetas a partir de la cascarilla y la borra de café.

### **Modelo integral de aprovechamiento de los subproductos del café para la producción de alimentos para consumo humano y animal, biocombustibles y abonos orgánicos**

En la Figura 56 se presentan varias rutas de producción de diferentes materiales de valor agregado a partir de la aplicación de los conceptos de la bioeconomía circular y biorrefinería a la pulpa de café.

A partir de la pulpa de café se pueden obtener alimentos para consumo humano, alimentos para consumo animal, biocombustibles y pectinas, entre otros.

Un modelo integral tipo biorefinería se puede aplicar a través de los procesos de producción de pectinas y bioetanol. La pulpa residual de estos procesos se puede utilizar para el cultivo de hongos comestibles y nutracéuticos y el residuo sólido de este proceso se puede utilizar mediante procesos de larvicompostaje o lombricompostaje para la obtención de abono orgánico y biomasa animal (larvas y lombrices) para su uso en la alimentación animal. El residuo líquido del proceso de obtención de pectinas y las vinazas del proceso de obtención del bioetanol se puede manejar mediante digestión anaerobia para la producción de biogás y el efluente de este proceso se puede llevar a humedales artificiales sembrados con macrófitas y a filtros verdes cero descargas sembrados con pasto vetiver, evitando cualquier tipo de vertimientos. La biomasa generada en los humedales y en los filtros verdes se puede utilizar para el cultivo de hongos comestibles y nutracéuticos o para la elaboración de abonos verdes realizando un aprovechamiento total de la biomasa.

A partir del mucilago de café se puede producir miel de café que se puede utilizar en alimentación humana o animal o para la producción de bioetanol y las vinazas del proceso de obtención del bioetanol se puede manejar mediante digestión anaerobia para la producción de biogás y el efluente de este proceso se puede llevar a humedales artificiales sembrados con macrófitas y a filtros verdes cero descargas sembrados con pasto vetiver, evitando cualquier tipo de vertimientos. La biomasa generada en los humedales y en los filtros verdes se puede utilizar para el cultivo de hongos comestibles y nutracéuticos o para la elaboración de abonos verdes realizando un aprovechamiento total de la biomasa.

La cascarilla y los tallos de café se puede utilizar directamente como combustibles sólidos o se pueden utilizar como materia prima para la elaboración de biocarbón o

para su gasificación y la obtención de energía eléctrica a partir de la combustión del syngas generado. De igual forma se pueden utilizar para obtener bioetanol celulósico y las vinazas del proceso de obtención del bioetanol se puede manejar mediante digestión anaerobia para la producción de biogás y el efluente de este proceso se puede llevar a humedales artificiales sembrados con macrófitas y a filtros verdes cero descargas sembrados con pasto vetiver, evitando cualquier tipo de vertimientos. La biomasa generada en los humedales y en los filtros verdes se puede utilizar para el cultivo de hongos comestibles y nutracéuticos o para la elaboración de abonos verdes realizando un aprovechamiento total de la biomasa.

### **Modelo integral de manejo de los subproductos del café de acuerdo con el tamaño de la producción**

**Para los pequeños productores,** la implementación del despulpado en seco, acompañado de la racionalización del agua en el lavado (mediante la utilización de la tecnología del tanque tina), el tratamiento de las aguas mieles en los Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio, SMTA, (para generar biogás) acompañado de un postratamiento con macrófitas (para producir biomasa y abonos verdes) y filtros verdes (para alcanzar cero descargas), reflejan la implementación de un manejo integrado del agua sin impactar negativamente el medio ambiente. Para estos mismos productores, la utilización de la lombricultura en la transformación de la pulpa de café en abono orgánico para utilizarlo de nuevo en el cultivo y utilizar la biomasa de lombriz en alimentación de pollos de engorde, gallinas ponedoras y piscicultura y la utilización de los tallos de café como combustible en la cocción de alimentos reflejan un manejo integrado de los subproductos del proceso de beneficio en armonía con el medio ambiente.

**Para los productores medianos y grandes (manejo de residuos líquidos),** la implementación del despulpado en seco, acompañado de la racionalización del agua en el lavado (mediante la utilización de la tecnología del tanque tina o mediante el desmucilaginado mecánico o los lavadores mecánicos), el tratamiento de las aguas mieles en los Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio (para producir biogás) acompañado de un postratamiento con macrófitas (para producir biomasa que puede utilizarse en la producción de abono orgánico y cultivo de hongos comestibles y nutracéuticos) y filtros verdes (para alcanzar cero descargas), reflejan la implementación de un manejo integrado del agua sin impactar negativamente el medio ambiente.

**Para los medianos productores (manejo de residuos sólidos),** la utilización de la pulpa de café, el aserrín de los tallos del café y los subproductos de los cultivos asociados al café (plátano, maíz, frijol, cítricos, entre otros) para la producción de hongos comestibles y nutracéuticos, cuyos carpóforos pueden emplearse como alimento (por su alto contenido proteico) y como medicina natural (por la gran cantidad de biocompuestos con propiedades medicinales) y la utilización del sustrato residual del cultivo de los hongos para la lombricultura, permite que se obtengan abonos orgánicos para emplearlos de nuevo en el campo y biomasa de lombrices para la alimentación animal. Adicionalmente, los tallos de café pueden emplearse como combustible para la cocción de alimentos y para el secado mecánico del café, reflejando un manejo integrado de los subproductos del proceso de beneficio en armonía con el medio ambiente.

**Para los grandes caficultores (manejo de residuos sólidos),** un manejo integrado de los subproductos sólidos puede realizarse utilizando la pulpa y el mucílago para la producción de alcohol carburante o pectinas.

Los residuos del proceso de fermentación alcohólica, como la pulpa residual, para el cultivo de hongos comestibles y nutracéuticos mezclado con aserrín de tallo de café y subproductos de cultivos asociados, y el sustrato residual del cultivo de los hongos para la producción de abono orgánico para integrarlo de nuevo en la producción del café.

El tratamiento de las vinazas generadas en el proceso de destilación del alcohol y de las aguas residuales generadas en el proceso de beneficio puede realizarse mediante digestión anaeróbica en Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio y permite la obtención de biogás para ser utilizado como combustible en el mismo proceso de destilación y el efluente líquido de la digestión anaerobia puede conducirse a las lagunas

con macrófitas y luego a filtros verdes para alcanzar cero descargas.

Finalmente, la utilización de los tallos de café y de la cascarilla proveniente de la trilla del grano, como energía renovable para ser utilizada en los procesos de producción de alcohol y de secado mecánico de café y la gasificación de los tallos de café para la generación de energía eléctrica son un ejemplo claro de un manejo integrado de los subproductos, en armonía con el medio ambiente, lográndose el propósito de la nueva caficultura, producción de café con cero residuos:

Beneficios para el productor, beneficios para el medio ambiente.

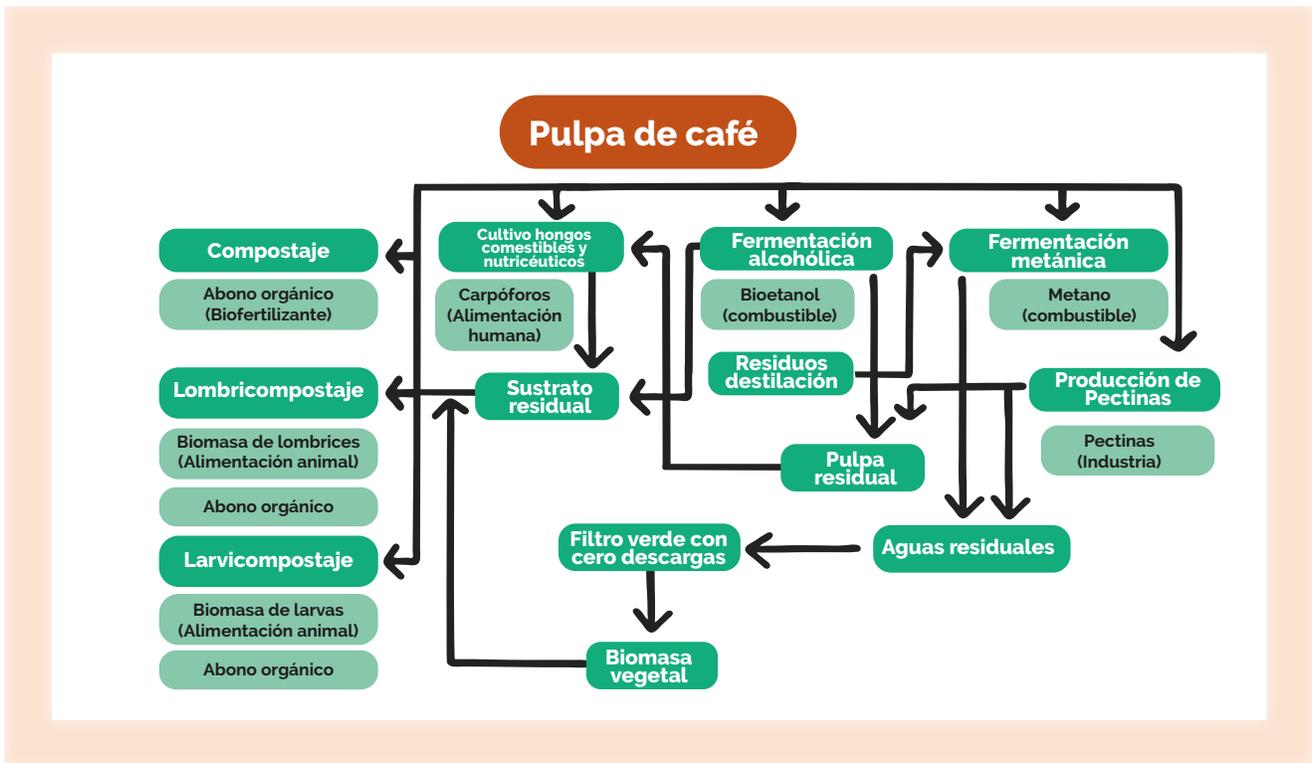


Figura 53. Modelo de biorefinería utilizando como materia prima la pulpa de café.



## Consideraciones finales

A través del proceso de cosecha, beneficio e industrialización del café se generan diversos subproductos (hojas, pulpa, mucílago, cascarilla, película plateada, borra y tallos), con diferente composición química que los hace aptos para la producción de diversos productos de valor agregado.

Algunos subproductos del proceso tienen contenidos de humedad inferiores al 50%, lo que facilita su manejo y aprovechamiento (hojas, cascarilla, película plateada, tallos), mientras que otros subproductos tienen contenidos de humedad superiores al 60% (pulpa, borra, mucílago), siendo necesario aprovecharlos inmediatamente o aplicar procesos que permitan su estabilidad en el tiempo (deshidratación y ensilaje, entre otros).

Las hojas separadas de la masa cosechada utilizando la cosecha asistida de café con lonas (Sanz et al., 2022) pueden procesarse para la elaboración de bebidas o como fuente para la obtención de antioxidantes, por ser la parte de la planta de café en donde se han determinado los mayores contenidos.

La pulpa y el mucílago de café, que tienen las más altas humedades naturales, superiores al 75%, son los materiales que se producen en mayor cantidad, representando el 43,58% y el 14,85% del peso del fruto fresco, respectivamente. Dado que su producción es muy dispersa geográficamente y que la mayoría de los productores de café son pequeños agricultores, con áreas sembradas en café inferiores a 1,3 ha, su principal aprovechamiento en la finca,

para el caso del mucílago, es para la producción de miel de café, que no sólo permite su conservación por lo concentrado de los azúcares (alrededor de 70°Brix), sino también que esta miel puede utilizarse en la alimentación humana o animal, para la producción de levaduras alimenticias o para la producción de biocombustibles (bioetanol, biohidrógeno y biogás). Para el caso de la pulpa de café, podría secarse al sol para la posterior producción de bebidas o transformarse en abono orgánico mediante procesos de lombricompostaje y larvicompostaje, generando un abono con unas excelentes características microbiológicas y físico-químicas que se puede utilizar en los planes de fertilización de la finca, reemplazando una parte del fertilizante químico convencional, y que adicionalmente, los procesos de lombricompostaje y larvicompostaje, generan proteína animal (biomasa de lombrices y larvas de mosca) que puede ser utilizada en la finca para la alimentación de pollos de engorde, gallinas ponedoras y peces, entre otros.

Para el caso de las centrales de beneficio, en las cuales se concentra la pulpa y el mucílago generados, su industrialización es más factible, pudiéndose obtener de la pulpa y el mucílago: miel, pectinas y antioxidantes. También pueden cultivarse hongos comestibles y nutracéuticos sobre la pulpa de café fresca o ensilada o sobre la pulpa residual generada en los procesos de obtención de miel, pectinas y antioxidantes o secarse la pulpa al sol o en silos que utilicen cascarilla de café o astillas de tallos de café como combustible, para la obtención de bebidas, mermeladas y harinas. La pulpa residual proveniente del cultivo de los hongos comestibles y nutracéuticos se puede utilizar para la elaboración de abono orgánico mediante procesos de compostaje y lombricompostaje.

Considerando los altos costos de los concentrados para alimentación animal

(pollos de engorde, gallinas ponedoras, piscicultura y porcicultura, entre otros), los subproductos del café, podrían utilizarse directamente como suplemento de las dietas o como materias primas para la producción de proteína animal (lombrices, larvas) o proteína unicelular (levaduras alimenticias) que tendrían su aplicación en la alimentación animal.

Los subproductos del café pueden utilizarse para la elaboración de abonos orgánicos, con características físico-químicas y microbiológicas, superiores a la de los abonos de síntesis y que puede reemplazar parte de la fertilización química y reducir costos de producción, considerando el alto costo del fertilizante químico, a la vez que se reduce la emisión de gases efecto invernadero en la etapa de fertilización, contribuyendo a las acciones de mitigación del cambio climático.

Los subproductos del café son una fuente de energía renovable, que puede utilizarse directamente como combustible o como materia prima para la producción de biocombustibles tales como biogás, bioetanol, biodiésel, biohidrógeno, biocarbón (a partir de la pirolisis de la biomasa), syngas (a partir de la gasificación de los tallos de café), con la ventaja de que son menos contaminantes que los combustibles fósiles, minimizando las emisiones de carbono y azufre y contribuyendo a la mitigación de emisiones de gases efecto invernadero.

Aplicando los modelos de biorrefinería y bioeconomía circular, a partir de la pulpa de café se puede producir miel (por el prensado de la pulpa y la concentración de sus jugos) con sus aplicaciones en el área alimenticia (humana y animal) y en el área de biocombustibles (producción de biogás, bioetanol, biohidrógeno), la pulpa residual del proceso de producción de miel, se puede utilizar para el cultivo de hongos comestibles y nutracéuticos con sus aplicaciones en el

área alimenticia y farmacéutica y el sustrato residual de la producción de hongos se puede utilizar para la producción de abono orgánico y proteína animal a partir de los procesos de lombricompostaje y larvicompostaje, generando de esta manera cero residuos, con beneficios para el productor y beneficios para el medio ambiente.

Para el caso de las aguas residuales generadas en el proceso de beneficio del fruto, su manejo y tratamiento utilizando la tecnología de filtros verdes con cero descargas, evita que se presenten vertimientos en el medio natural y permite la incorporación al suelo de los nutrientes presentes en el agua residual, mejorando sus características físico-químicas y microbiológicas y la cosecha del material vegetal utilizado en el área de cultivo del filtro verde que puede ser utilizado en la alimentación animal, en la producción de abonos verdes o como sustrato para el cultivo de hongos comestibles y nutracéuticos y el sustrato residual de este proceso puede ser utilizado para la producción de abono orgánico y proteína animal a partir de los procesos de lombricompostaje y larvicompostaje, generando de esta manera cero residuos, con beneficios para el productor y beneficios para el medio ambiente.

Frente al nuevo desarrollo realizado en Cenicafé por Góngora et al. (2023) quienes encontraron que el oleato de cafeína es un insecticida eficaz para el control de la broca de café y el minador de las hojas y de otros insectos plaga de varios cultivos, sería

importante explorar la extracción de cafeína de las hojas de café (en las cuales se han reportado valores de cafeína entre 1,8 y 3,2 mg g<sup>-1</sup> de hoja seca) y de la pulpa de café (en la cual se reportan valores de cafeína entre 7,5 y 22,6 mg g de pulpa seca) y la obtención del ácido oleico a partir de la borra de café y de los granos de café almendra de calidad inferior, con el fin de producir este plaguicida como un producto natural.

De igual manera, la cantidad de frutos verdes recolectados con la estrategia de la cosecha asistida (que representa cerca del 6% de la masa total cosechada), se constituye en una materia prima que se debe valorizar, con el fin de contribuir a la rentabilidad del negocio cafetero. Quintero & Rodríguez, 2022, en Cenicafé, evaluaron el efecto del manejo de frutos verdes de café, previo al proceso de beneficio, en su calidad física y concluyeron que es posible aplicar un método de manejo de los frutos verdes que permite mejorar su calidad física y obtener un precio de venta superior al de los frutos verdes sin manejo. Quintero (2021), en Cenicafé, reporta por cada kilogramo de frutos verdes secos, valores promedio de cafeína de 13,9 g, ácido clorogénico de 1,23 g, ácido cafeico de 0,68 g, sacarosa de 57,4 g, fenoles totales de 9,04 g ácido gálico eq., flavonoides de 2,00 g catequina eq., taninos de 1,44 g catequina eq., carotenoides de 0,02 g de caroteno eq., lo que los convierte en una materia prima importante para la obtención de cafeína y de compuestos antioxidantes.





## Literatura citada

- Acejias, W. (2017). Uso de *Saccharomyces cerevisiae* en el alimento de cerdos en acabado [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3460>
- Acevedo, L. & Rueda, L. E. (1986). *Estudio de factibilidad del montaje de una planta industrial de pectina* [Proyecto de investigación presentado a Proinder LTDA]. Universidad Industrial de Santander.
- Acosta Meza, Z., & Celis Barahona, N. (2021). *Evaluación de dos disolventes en la extracción de aceite a partir de borra de café* [Tesis de pregrado, Universidad de La Salle]. [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_alimentos/726](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/726)
- Agudelo, R.A. (2002). *Obtención de etanol a partir de la borra de café* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76266>
- Alzate, G. P. (2007). Evaluación del proceso de cultivo del hongo maitake (*Grifola frondosa*) en subproductos agrícolas de la zona cafetera [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Alzate-Gaviria, L., Fuentes-Albarrán, C., Álvarez-Gallegos, A., & Sebastián, J. (2008). Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM. *Interciencia*, 33(7), 510–517.
- Apaza, R. B. (2020). Correlación de índices productivos con suplementación de harina de larva de mosca *Hermetia illucens* a tres niveles versus fuente proteica estándar en alimentación de pollos *Ross, Arequipa 2019* [Tesis de Maestría, Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/9883>
- Arango, G. P., Vergara, R. A., & Mejía, H. (2004). Análisis composicional, microbiológico y digestibilidad de la proteína de la harina de larvas de *Hermetia illucens* L (Diptera: Stratiomyidae) en Angelópolis- Antioquia, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 57(2), 2491–2499. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/24234>
- Arcila, F. (1979, diciembre 3–5). *Producción de biogás a base de pulpa de café* [Presentación]. II Reunión Internacional sobre la utilización integral de los subproductos de café, Guatemala.

- Arcila, J., & Farfán, F. F. (2007). Consideraciones sobre la nutrición mineral y orgánica en los sistemas de producción de café. En J. Arcila, F.F. Farfán, A. M. Moreno, L.F. Salazar, & E. Hincapié (Eds.), *Sistemas de producción de café en Colombia* (pp. 201–232). Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/720>
- Arellano, M. A., Ramírez-Coronel, M. A., Torres-Mancera, M. A., Pérez-Morales, G., & Saucedo-Castañeda, G. (2011). Antioxidant Activity of Fermented and Nonfermented Coffee (*Coffea arabica*) Pulp Extracts. *Food Technology and Biotechnology*, 49(3), 374–378. [https://www.ftb.com.hr/images/pdfarticles/2011/July-September/ftb\\_49\\_374.pdf](https://www.ftb.com.hr/images/pdfarticles/2011/July-September/ftb_49_374.pdf)
- Arias, M., Henao, L., & Castrillón Gutiérrez, Y. (2009). Producción de ácido láctico por fermentación de mucílago de café con *Lactobacillus bulgaricus* NRRL-B548. *Dyna*, 76(158), 147–153. <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v76n158/a14v76n158.pdf>
- Aristizábal-Marulanda, V., Chacón-Pérez, Y., Cardona A., C. A. (2017). Chapter 3 - The biorefinery concept for the industrial valorization of coffee processing by-products. In C. M. Galanakis (Eds.), *Handbook of Coffee Processing By-Products. Sustainable Applications* (pp.63–92). Elsevier. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811290-8.00003-7>
- Aristizábal-Marulanda, V., García-Velásquez, C. A., Cardona A., C. A. (2021). Environmental assessment of energy-driven biorefineries: the case of the coffee cut-stems (CCS) in Colombia. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 26, 290–310. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01855-0>
- Balat, H. & Kirtay, E. (2010). Hydrogen from biomass – Present scenario and future prospects. *International Journal of hydrogen energy*, 35(14), 7416–7426. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.137>
- Balseca-Sampedro, O. F., López-Ortiz, S. A., Viteri-Núñez, E. F., Analuisa-López, D. S., & Hernández-Gavilanes, E. V. (2018). Elaboración, caracterización y posibles aplicaciones de briquetas de residuos de café como biocombustible sólido. *Polo del Conocimiento*, 3(7), 420–452. <https://doi.org/10.23857/pc.v3i7.565>
- Ballesteros, M. (1998, mayo 19–21). *Uso energético de la biomasa* [Presentación]. Seminario internacional sobre aprovechamiento de residuos agroindustriales-UNAL, Manizales, Colombia.
- Banu, J. R., Kavitha, S., Kannah, R. Y., Kumar, M. D., Preethi, J., Atabani, A. E., & Kumar, G. (2020). Biorefinery of spent coffee grounds waste: Viable pathway towards circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, (302), 122821. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122821>
- Barragan-Fonseca, K. B., Dicke, M., & van Loon, J. J. A. (2017). Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed – a review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(2), 105–120. <https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0055>
- Barrera López, J. A., & Sánchez Velandia, P. F. (2020). *Evaluación de la cascarilla de café como sustituto a las grasas utilizadas en la elaboración de brownies* [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/44612>
- Bastidas, M., Buelvas, L. M., Márquez, M. I., & Rodríguez, K. (2010). Producción de Carbón Activado a partir de Precursores Carbonosos del Departamento del Cesar, Colombia. *Información tecnológica*, 21(3), 87–96. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642010000300010>
- Bevilaqua, J. V. (2009, abril 28–30). *P&D Petrobras. Etanol utilizando enzimas* [Presentación]. Bio 2009. IV seminario Latinoamericano y del Caribe de biocombustibles, Cali, Colombia.
- Biomass Users Network. (2002). *Manuales sobre energía renovable: Biomasa*. BUN-CA.

- Blandón-Castaño, G., Dávila-Arias, M. T., & Rodríguez-Valencia, N. (1999). Caracterización microbiológica y fisico-química de la pulpa de café sola y con mucílago, en proceso de lombricompostaje. *Revista Cenicafé*, 50(1), 5–23.
- Blandón-Castaño, G., Rodríguez-Valencia, N., & Dávila-Arias, M. T. (1998). Caracterización microbiológica y fisico-química de los subproductos del beneficio del café en proceso de compostaje. *Revista Cenicafé*, 49(3), 169–185.
- Borunda, P., Hernández, A., & Ramírez, E. (2021). Residuo de café transformado en bioplástico. En E. Serna (Ed.), *Ciencia transdisciplinaria para el desarrollo y la supervivencia de la humanidad* (pp. 59–72). Editorial Instituto Antioqueño de Investigación.
- Botello, A. C. (2022). Exploración material con el residuo orgánico urbano. Borra de café. [Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB\\_UMICH/6673](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/6673)
- Brito, M. (1990, junio 11–15). *Aprovechamiento de los subproductos del café* [Presentación]. Seminario sobre Valorización de los Subproductos del Café, Quito, Ecuador.
- Bueno, J. (1987). La madera como combustible. *Revista Forestal del Perú*, 14(2), 1–9. <https://doi.org/10.21704/rfp.v14i2.135>
- Buitrago, J., Calle, H., Gallo, J. T., & Corso, M. A. (1970). Evaluación de la melaza de café en dietas para cerdos en crecimiento y acabado. *Revista ICA*, 5(4), 407–410.
- Cabrera, D. E., Calzada, J. F., & Arriola, M. C. (1987). *Etanol de cerezas y mucílago de café* [Presentación]. III Simposio Internacional sobre la utilización integral de los subproductos del café, Quito, Ecuador.
- Calle, H. (1977). Subproductos del café. *Boletín Técnico Cenicafé*, 6, 1–84. <https://www.cenicafe.org/es/publications/bot006.pdf>
- Calle, H. (1974). Cómo producir gas combustible con pulpa de café. *Boletín Técnico Cenicafé*, 3, 1–12.
- Calle, H. (1973). Baterías eléctricas con pulpa y mucílago de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 25, 1–4. <https://doi.org/10.38141/10779/0025>
- Calle, H. (1962). Métodos de extracción de las pectinas del café. *Revista Cenicafé*, 13(2), 69–74. <http://hdl.handle.net/10778/751>
- Calle, H. (1960). Aceites del café. *Revista Cenicafé*, 11(9), 251–258.
- Calle, H. (1958). Tentativas para la preparación de productos alimenticios del café, distinta a la bebida. *Revista Cenicafé*, 9(9–10), 222–227.
- Calle, H. (1955). Producción de gas combustible por fermentación metánica de la pulpa de café (Informe del proyecto QI-10). *Revista Cenicafé*, 6(66), 198–205.
- Calle, H. (1955). Perspectivas para el empleo de la pulpa y ripios del café como materiales curtientes. *Revista Cenicafé*, 6(62), 69–71
- Calle, H. (1951). Propagación de levaduras alimenticias en la pulpa y mucílago del café. *Revista Cafetera de Colombia*, 10(122), 3730–3732.
- Calle, H. (1951). Producción de alcohol con los desperdicios del café. *Revista Cenicafé*, 2(22), 33–34.
- Calle, H. (1951). Ensayo sobre cultivo de levaduras alimenticias en pulpa de café. *Revista Cenicafé*, 2(14), 33–36.
- Camacho, A. F., & Sánchez, D. C. (2022). *Desarrollo de una propuesta para la extracción de un pigmento obtenido desde la fase madura del exocarpio del café*. [Tesis de pregrado, Fundación Universidad de América]. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8820>
- Camacho, Y. K., & Lizarazo, Y. N. (2021). *Producción de ácido láctico a partir del proceso de*

- fermentación de la pulpa de café* [Tesis de pregrado, Universidad Libre de Colombia]. <https://hdl.handle.net/10901/19539>
- Campabadal, C. (1987). *Utilización de la pulpa de café en la alimentación de animales* [Presentación]. III Simposio Internacional sobre la utilización integral de los subproductos del café, Quito, Ecuador.
- Cansino, A. F., & Olano, M. (2021). *Incorporación del mucilago de café para elevar la resistencia a la compresión del adobe convencional en Jaén 2021* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/69560>
- Carnier, R., Coscione, A. R., Abreu, C. A. de, Melo, L. C. A., & Silva, A. F. (2022). Cadmium and lead adsorption and desorption by coffee waste-derived biochars. *Bragantia*, 81, e0622. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20210142>
- Carrillo, L. (2004). *Energía de biomasa*. <http://www.bio-nica.info/biblioteca/Carillo2004.pdf>
- Castillo, M. P., Torstensson, L., & Stenström, J. (2008). Biobeds for Environmental Protection from Pesticide Use—A Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(15), 6206–6219. <https://doi.org/10.1021/jf800844x>
- Castrillón, M. (2018). *Desarrollo de tableros de madera de café a partir del desecho generado en el soqueo del arbusto* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Pereira]. <http://repositorio.ucp.edu.co/handle/10785/5329>
- Cedeño, N. J., & Zambrano, J. C. (2021). *Diseño de una línea de producción para la obtención de bioplásticos aprovechando los residuos del café a escala industrial en la ciudad de Quevedo* [Tesis de pregrado, Quevedo-Ecuador]. <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/6115>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (1992). La renovación de los cafetales por zoca. *Avances Técnicos Cenicafé*, 174, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0174>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (1999). *Informe anual de actividades Disciplina de Química Industrial 1998-1999*.
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2013). *Informe anual de actividades Disciplina de Gestión de Recursos Naturales y Conservación 2012-2013*.
- Cevallos, J. A., & Guerrero, J. Y. (2017). *Extracción y caracterización de colorante natural a partir de la Borra de Café* [Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil]. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/18241>
- Corona, M., Diaz, A., Paéz, G., Ferrer, J., Mármol, Z., & Ramones, E. (1996). Extracción y caracterización de pectina de la corteza de parchita. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 13(6), 785–791. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/26114>
- Dávila, M. T., & Ramírez, C. A. (1996). Lombricultura en pulpa de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 225, 1–12. <https://doi.org/10.38141/10779/0225>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2020). *Economía Circular: Primer Reporte 2020*. DANE. <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/economia-circular/economia-circular-1-reporte.pdf>
- Díaz, M. Y., & Elias, G. N. (2017). Propuesta para la obtención de un colorante natural a partir de la pulpa seca del *Coffea arabica* Café [Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador]. <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/159115>
- Erazo, S., & Agudelo-Escobar, L. M. (2023). Determination of Electrogenic Potential and Removal of Organic Matter from Industrial Coffee Wastewater Using a Native Community in a Non-Conventional Microbial Fuel Cell. *Processes*, 11 (2), 373. <https://doi.org/10.3390/pr11020373>
- Farfán, F. F. (1994). El zoqueo del café conserva el bosque nativo. *Avances Técnicos Cenicafé*, 209, 1–4. <http://hdl.handle.net/10778/1067>

- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2000). *Aspectos de calidad del café para la industria: Vademecum del tostador colombiano*. FNC.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2021). *Informe del Gerente al 89 Congreso Nacional de Cafeteros Virtual*. FNC.
- Ferruzi, C. (1986). *Manual de lombricultura*. Editorial Mundiprensa.
- Figueredo, J., & Albarracín, M. (2021). Alternativas de alimentación de monogástricos a base de larvas de Soldado Negro (*Hermetia illucens*): Revisión de literatura. *Revista Colombiana de Zootecnia*, 7(12), 35–48. <http://anzoo.org/publicaciones/index.php/anzoo/article/view/102/99>
- Fonseca, L., Calderón-Jaimes, L. S., & Rivera, M. E. (2014). Capacidad antioxidante y contenido de fenoles totales en café y subproductos del café producido y comercializado en Norte de Santander (Colombia). *Vitae*, 21(3), 228-236. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.17258>
- Fundación Natura, & World Wildlife Fund. (2003). *Energías renovables: Conceptos y aplicaciones*. Fundación Natura.
- Garavito, A., & Puerta, G. (1998). Utilización del mucílago de café en la alimentación de cerdos. *Avances Técnicos Cenicafé*, 24(8), 1–12. <https://doi.org/10.38141/10779/0248>
- Garavito, A., & Puerta, G. (1998). Utilización del mucílago de café en la alimentación de cerdos. *Revista Cenicafé*, 49(3), 231–256.
- García, J. M., & García, J. A. (2007). *Biocarburantes líquidos: Biodiésel y bioetanol*. CITME.
- García, A. F., & Riaño, C. E. (1998). Extracción de colorantes de la borra de café. *Revista Cenicafé*, 49(2), 119–128.
- García, R., Arriola, D., Porres, E., & Rolz, C. (1987, febrero 16-18). *Caracterización de la pectina de café* [Presentación]. III Reunión Internacional sobre la utilización integral de los subproductos de café, Ciudad de Guatemala, Guatemala.
- Giraldo, S. L. (1999). *Fermentación vinica de la pulpa y el mucilago del café* [Práctica institucional]. Universidad de la Sábana.
- Giraldo, M., Rodríguez, N., & Benavides, P. (2019). Uso potencial de *Hermetia illucens* (Linnaeus) (Diptera: Stratiomidae) para transformación de pulpa de café: Aspectos biológicos. *Revista Cenicafé*, 70(2), 81–90.
- Gómez, F. A. (1997). Estudio del cultivo de los hongos *Pleurotus ostreatus* (Jacq. Ex Fr.) Kumm y *Pleurotus sajor-caju* (Fr.) Sing en pulpa de café [Tesis de pregrado]. Universidad Católica de Manizales.
- Gómez, J. (1994). Calidad de lombricomposto. *Recursos Biológicos Nuevos*, 14, 4–5.
- Góngora, C.E., Tapias, J., Jaramillo, J., Medina, R., González, S., Restrepo, T., Casanova, H., & Benavides, P. A Novel Caffeine Oleate Formulation as an Insecticide to Control Coffee Berry Borer, *Hypothenemus hampei*, and Other Coffee Pests. *Agronomy* 2023, 13, 1554. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061554>
- Grisales, A. L., & Rojas, W. (2016). *Obtención de carbón activado a partir de activación química de pulpa de café y su aplicación en la remoción de colorantes en aguas residuales industriales* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira]. <https://hdl.handle.net/11059/6965>
- Gualtieri, M. J., Villalta, C., Díaz, L. E., Medina, G., Lapenna, E., & Rondón, M. E. (2007). Producción de biomasa de *Saccharomyces cerevisiae* y *Candida utilis* usando residuos de pulpa de *Coffea arabica* L. *Revista del Instituto Nacional de Higiene Rafael Rangel*, 38(2), 31–37.
- Guevara, M. (2019). *Carbón Activado a Partir de la Pulpa de la Cereza de Café Mediante Activación Química* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén]. <https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/53>

- Gutiérrez, A. (2002). Café, antioxidantes y protección a la salud. *Revista MEDISAN*, 6(4), 72–81.
- Hartati, I., Riwayati, I., & Kurniasari, L. (2012). Potential Production of Food Colorant from Coffee Pulp. *Prosiding Seminar Sains Nasional Dan Teknologi*, 1(1), 66–71. <https://doi.org/10.36499/psnst.v1i1.24>
- Heeger, A., Kosińska-Cagnazzo, A., Cantergiani, E., & Andlauer, W. (2017). Bioactives of coffee cherry pulp and its utilisation for production of Cascara beverage. *Food Chemistry*, 221, 969–975. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.067>
- Hernández, M. A., Rodríguez, M., & Andres, Y. (2014). Use of coffee mucilage as a new substrate for hydrogen production in anaerobic co-digestion with swine manure. *Bioresource Technology*, 168, 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.101>
- Herrera, Y., & Saldaña, R. (1991, noviembre 4). *Ensilaje de pulpa de café* [Presentación]. II Seminario Internacional Sobre Biotecnología en la Agroindustria Cafetalera, Manizales, Colombia.
- Herryman, M., & Blanco, G. (2005). Ácido láctico y poliláctico: Situación actual y tendencias. *ICIDCA*, 39(1), 49–59. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659007>
- Hobbs, C. (1996). *Medicinal mushrooms: An exploration of tradition, healing e culture*. Interweave Press.
- Hughes, S. R., López-Núñez, J. C., Jones, M. A., Moser, B. R., Cox, E. J., Lindquist, M., Galindo-Leva, L. A., Riaño-Herrera, N. M., Rodríguez-Valencia, N., & Gast, F. (2014). Sustainable conversion of coffee and other crop wastes to biofuels and bioproducts using coupled biochemical and thermochemical processes in a multi-stage biorefinery concept. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 98, 8413–8431. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5991-1>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2000). *NTC 708:2000 Bebidas alcohólicas. Vinos de frutas*. <https://tienda.icontec.org/gp-bebidas-alcoholicas-vinos-de-frutas-ntc708-2000.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2013). *NTC 708:2013 Grasas y aceites comestibles para fritura industrial*. <https://tienda.icontec.org/gp-grasas-y-aceites-comestibles-para-fritura-industrial-ntc3272-2013.html>
- Iriondo-DeHond, A., Elizondo, A. S., Iriondo-DeHond, M., Ríos, M. B., Mufari, R., Mendiola, J. A., Ibañez, E., & del Castillo, M. D. (2020). Assessment of Healthy and Harmful Maillard Reaction Products in a Novel Coffee Cascara Beverage: Melanoidins and Acrylamide. *Foods*, 9(5), 620. <https://doi.org/10.3390/foods9050620>
- Jaramillo, C., & Rodríguez, N. (2001). Cultivo de shiitake en subproductos del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 287, 1–4. <https://doi.org/10.38141/10779/0287>
- Jacquet, M. (1990, junio 11-15). *Producción de gas metano por digestión anaeróbica de la pulpa de café* [Presentación]. Seminario sobre Valorización de los Subproductos del Café, Quito, Ecuador.
- Jones, K. (1995). *Shiitake: The healing mushroom*. Healing Arts Press.
- Karmee, S. K. (2018). A spent coffee grounds based biorefinery for the production of biofuels, biopolymers, antioxidants and biocomposites. *Waste Management*, (72), 240–254. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.042>
- Kostenberg, D., Marchaim, U., Watad, A. A., & Epstein, E. (1995). Biosynthesis of plant hormones during anaerobic digestion of instant coffee waste. *Plant Growth Regulation*, 17(2), 127–132. <https://doi.org/10.1007/BF00024172>
- Kondamudi, N., Mohapatra, S. K., & Misra, M. (2008). Spent Coffee Grounds as a Versatile Source of Green Energy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(24), 11757–11760. <https://doi.org/10.1021/jf802487s>

- Kubo, K., & Nanba, H. (1996). The effect of maitake mushrooms on liver and serum lipids. *Alternative Therapies in Health and Medicine*, 2(5), 62–66.
- Kuskoski, E. M., Asuero, A. G., Troncoso, A. M., Mancini-Filho, J., & Fett, R. (2005). Aplicación de diversos métodos químicos para determinar actividad antioxidante en pulpa de frutos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 25(4), 726–732. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612005000400016>
- López, E. M. (2007). Extracción de aceite de café. *Ingeniería e Investigación*, 27(1), 25–31.
- López, E. M., & Castaño, J. J. (1999). Extracción de aceite a partir de subproductos de la trilla de café pergamino. *Revista Cenicafé*, 50(1), 66–77.
- Lozano, J. C. (1990). Producción comercial del champiñón *Pleurotus ostreatus* en pulpa de café. *Fitopatología Colombiana*, 14(2), 42–47.
- Llera, E. M., & Zabalza, I. (2011). Hidrógeno: Producción, almacenamiento y usos energéticos. *Prensas Universitarias de Zaragoza*. <https://zaguan.unizar.es/record/119583/files/BOOK-2022-037.pdf>
- Macheiner, L., Schmidt, A., Schreiner, M., & Mayer, H. K. (2019). Green coffee infusion as a source of caffeine and chlorogenic acid. *Journal of Food Composition and Analysis*, 84, 103307. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103307>
- Madrigal, E., & Chavarria, Y. (2020). Aprovechamiento de la pulpa residual del proceso agroindustrial del café (*coffea arábica*) para el desarrollo de productos alimenticios en cooperativas caficultoras [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Nacional]. <https://repositorio.utm.ac.cr/handle/20.500.13077/448>
- Manrique, F., & Montebancho, A. (2015). Elaboración de caramelos blandos tipo toffe utilizando miel de café (*coffea arábica* L.). [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/86>
- Manrique, R. J. (2018). *Estudio de la combustión de Pélet de Cisco de café* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/68662>
- Marcano, D. (2018). *Introducción a la Química de los Colorantes*. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales. <http://hdl.handle.net/10872/19390>
- Marín-López, S. M., Arcila-Pulgarín, J., Montoya-Restrepo, E. C., & Oliveros-Tascón, C. E. Escala de maduración para los frutos del caféto (*Coffea arábica* L.). *Avances Técnicos Cenicafé*, 315, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0315>
- Martínez, D. (1991, noviembre 4). El cultivo de *Pleurotus ostreatus* sobre la pulpa de café [Presentación]. II Seminario Internacional Sobre Biotecnología en la Agroindustria Cafetalera, Manizales, Colombia.
- Mateus, D. P., Morales, J. A., & Barreto, W. (2018). *Estructura En Madera de Coffea Arábica Para Construcciones en Bahareque* [Tesis de pregrado, Universidad La Gran Colombia]. <https://repositorio.ugc.edu.co/handle/11396/4375>
- Mestre, A. (1973). Utilización de la pulpa en almárgicos de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 28, 1–2. <https://doi.org/10.38141/10779/0028>
- Ministerio de Energía de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, & Global Environmental Facility. (2011). *Manual de biogás*. FAO.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Decreto Número 3930 de 2010 por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones*. <https://www.habitatbogota.gov.co/transparencia/normativa/decretos/decreto-3930-2010>

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Decreto número 50 de 2018. Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en relación con los Consejos Ambientales Regionales de la Macrocuenca (CARMAC), el Ordenamiento del Recurso Hídrico y Vertimientos y se dictan otras disposiciones.* <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=85084>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 631 del 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones* <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021). *Resolución 1256 del 2021. Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones.* <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf>.
- Ministerio de Minas y Energía. (2011). *Resolución 047 de 2011. Por la cual se regulan las pruebas y auditoría definidas en la Resolución CREG 005 de 2010.* [https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_creg\\_0047\\_2011.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0047_2011.htm)
- Miñón-Fuentes, R., & Aguilar-Juárez, O. (2019). Hydrogen production from coffee pulp by dark fermentation. *Water Sci Technol*, 80 (9), 1692–1701. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.416>
- Mirón-Mérida, V.A., Yáñez-Fernández, J., Montañez-Barragán, B., & Barragán Huerta, B. E. (2019). Valorization of coffee parchment waste (*Coffea arabica*) as a source of caffeine and phenolic compounds in antifungal gellan gum films. *LWT*, 101, 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.013>
- Montilla, J. (2006). *Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café* [Tesis de pregrado]. Universidad de Caldas.
- Moreno, E. L., & Zapata-Zapata, A. D. (2019). Biohydrogen production by co-digestion of fruits and vegetable waste and coffee mucilage. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 72 (3), 9007–9018. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n3.73140>
- Moreno, E. L., Zapata-Zapata, A. D., & Kim, D. (2019). Hydrogen Production from Coffee Mucilage in Dark Fermentation with Organic Wastes. *Energies*, 12 (1), 71. <https://doi.org/10.3390/en12010071>
- Nabais, J. V., Carrott, P., Ribeiro Carrott, M. M. L., Luz, V., & Ortiz, A. L. (2008). Influence of preparation conditions in the textural and chemical properties of activated carbons from a novel biomass precursor: The coffee endocarp. *Bioresource Technology*, 99(15), 7224–7231. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.068>
- Nabais, J. M. V., Nunes, P., Carrott, P. J. M., Ribeiro Carrott, M. M. L., Garcia, A. M., & Díaz-Díez, M. A. (2008). Production of activated carbons from coffee endocarp by CO<sub>2</sub> and steam activation. *Fuel Processing Technology*, 89(3), 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.11.030>
- Newton, L., Sheppard, C., Watson, D.W., Burtle, G., & Dove, R. (2005). Using the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens*, as a Value-Added Tool for the Management of Swine Manure (p. 17) [Report for Mike Williams - June 2005]. North Carolina State University.
- Nguyen, T. M. T., Cho, E. J., Song, Y., Oh, C. H., Funada, R., & Bae, H.-J. (2019). Use of coffee flower as a novel resource for the production of bioactive compounds, melanoidins, and bio-sugars. *Food Chemistry*, 299, 125120. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125120>

- Noriega, A., Silva, R., & García, M. (2008). Revisión: Utilización de la pulpa de café en la alimentación animal. *Zootecnia Tropical*, 26(4), 411–419.
- Novita, R., Kasim, A., Anggraini, T., & Putra, D. P. (2018). Kahwa daun: Traditional knowledge of a coffee leaf herbal tea from West Sumatera, Indonesia. *Journal of Ethnic Foods*, 5(4), 286–291. <https://doi.org/10.1016/j.jef.2018.11.005>
- Oliveira, L. S., Franca, A. S., Camargos, R. R. S., & Ferraz, V. P. (2008). Coffee oil as a potential feedstock for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 99(8), 3244–3250. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.074>
- Oliveira, L. S., Franca, A. S., Camargos, R. R., & Barros, M. C. (2003). Avaliacao preliminar da viabilidade de producao de biodiesel a partir de graos defeituosos de café. *Revista Brasileira de Armazenamento*, 7, 74–77.
- Oliveros, C. E., Ramírez, C. A., Rodríguez-Valencia, N., Sanz-Uribe, J. R., & Tibaduiza-Vianchá, C. A. (2022). Manejo y aprovechamiento de las aguas residuales del lavado del café con la tecnología ECOMILL®. *Avances Técnicos Cenicafé*, 538, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0538>
- Oliveros, C. E., Sanz, J. R., Ramírez, C. A., & Peñuela, A. (2009). Aprovechamiento eficiente de la energía en el secado mecánico del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 380, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0380>
- Oliveros, C. E., Sanz, J. R., & Rodríguez, N. (2017). Evaluación de un gasificador de flujo descendente utilizando astillas de madera de café. *Revista Cenicafé*, 68(2), 61–75.
- Ortiz, A. (2012). *Extracción y caracterización de metabolitos secundarios con capacidad antioxidantes presentes en frutos y subproductos de la cosecha de café y cacao* [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia.
- Ortiz, B., & Yate, P. (2020). *Desarrollo de un producto derivado de la pulpa de café, obtenida de la finca cafetera "Las Violetas" de la vereda La Uribe—Villahermosa, Tolima* [Tesis de pregrado, Universidad de La Salle]. [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_industrial/138](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_industrial/138)
- Petrosyan, H., Vanyan, L., Mirzoyan, S., Trchounian, A., & Trchounian, K. (2020). Roasted coffee wastes as a substrate for *Escherichia coli* to grow and produce hydrogen. *FEMS Microbiology Letters*, 367(11) 1-7. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnaa088>
- Pinto, R. R., Medina, J. A., Medina, F. J., Guevara, F., Gómez, H., Ley, A., & Carmona, J. (2014). Sustitución de melaza por mucilago de café (*Coffea arabica* L.) en bloques nutricionales para rumiantes. *Archivos de Zootecnia*, 63(241), 65–71. <https://doi.org/10.4321/S0004-05922014000100007>
- Ponce, F. C. (2018). Efecto de la sustitución parcial de la harina de trigo por harina de pulpa de café (*coffea arabica*) en el color, textura y contenido de minerales en galletas dulces [Tesis de maestría, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/1407>
- Porres, C., Calzada, J. F., & Rolz, C. (1987, febrero 16–18). *Combustión de la pulpa de café* [Presentación]. III Reunión Internacional sobre la utilización integral de los subproductos de café, Ciudad de Guatemala, Guatemala.
- Quintana, G., Velásquez, J., Gómez, C., & Echavarría, Y. (2008). Adsorción de Ni(II) en carbón activado de cascarilla de café. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 3, 1–6. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/7188>
- Quintero Y., L.V. (2021). Informe final de la investigación POS107020. Evaluación de alternativas de beneficio para el fruto verde de café. [Informe Técnico]. Cenicafé. Disciplina Poscosecha.
- Quintero Y., L.V., & Rodríguez V., N. (2022). Efecto del manejo de frutos verdes de café, previo al proceso de beneficio, en su calidad física. *Revista Cenicafé*, 73(2), 19–31.
- Rajarathnam, S., & Bano, Z. (1991). Biological utilization of edible fruiting fungi. En

- D. Arora, K. Mukerji, & E. Math (Eds.), *Handbook of Applied Mycology: Foods and Feeds* (Vol. 3, pp. 241–292). Marcel Dekker.
- Ratanamarno, S., & Surbkar, S. (2017). Caffeine and catechins in fresh coffee leaf (*Coffea arabica*) and coffee leaf tea. *Maejo International Journal of Science and Technology*, 11(3), 211–218.
- Renaudie, M., Dumas, C., Vuilleumier, S., & Ernst, B. (2022). New way of valorization of raw coffee silverskin: Biohydrogen and acetate production by dark fermentation without exogenous inoculum. *Bioresource Technology Reports*, 17, 100918. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100918>
- Reynes, M. (1990, junio 11–15). *Valorización energética de las cáscaras de café* [Presentación]. Seminario sobre Valorización de los Subproductos del Café, Quito, Ecuador.
- Roa, G., Oliveros, C. E., Álvarez, J., Ramírez, C. A., Sanz, J. R., Dávila, M. T., Álvarez, J. R., Zambrano, D. A., Puerta, G. I., & Rodríguez, N. (1999). *Beneficio ecológico del café*. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/882>
- Rodríguez, N. (2003). Ensilaje de pulpa de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 313, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0313>
- Rodríguez, N. (2009). Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrofitas acuáticas [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/4342>
- Rodríguez, N. (2013). Producción de alcohol a partir de la pulpa de café. *Revista Cenicafé*, 64(2), 78–93.
- Rodríguez, N., Araque, M. L., & Perdomo, F. (2006). *Producción de los hongos comestibles orellanas y shiitake*. Cenicafé.
- Rodríguez, N., Duque Orrego, H., Jaramillo-Cardona, C. M., & Quintero-Yepes, L. (2022). Adopción del beneficio ecológico del café en Colombia. *Avances Técnicos Cenicafé*, 543, 1–12. <https://doi.org/10.38141/10779/0543>
- Rodríguez, N., & Gómez, F. A. (2001). Cultivo hongos comestibles en pulpa de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 285, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0285>
- Rodríguez, N., & Jaramillo, C. (2005a). Cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus* sobre residuos agrícolas de la zona cafetera. *Boletín Técnico Cenicafé*, 27, 1–56.
- Rodríguez, N., & Jaramillo, C. (2005b). Cultivo de hongos medicinales sobre residuos agrícolas de la zona cafetera. *Boletín Técnico Cenicafé*, 28, 1–72.
- Rodríguez, N., Quintero-Yepes, L., & Castañeda, S. A. (2022). *Tecnología de filtros verdes para el manejo, tratamiento y cero descargas de las aguas residuales de la finca cafetera*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0029>
- Rodríguez, N., Sanz, J. R., Oliveros, C. E., & Ramírez, C. A. (2015). Beneficio del café en Colombia: Prácticas y estrategias para el ahorro, uso eficiente del agua y el control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café. Cenicafé. <http://hdl.handle.net/10778/659>
- Rodríguez, N., Sanz-Urbe, J. R., Ramírez, C. A., Quintero-Yepes, L., & Tibaduiza-Vianchá, C. A. (2021). Tipificación del beneficio del café en Colombia, relación con el consumo de agua, generación de vertimientos y huellas hídricas azul y gris. *Boletín Técnico Cenicafé*, 46, 1–40. <https://doi.org/10.38141/10781/046>
- Rodríguez, N., & Zambrano, D. A. (2010). Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. *Avances Técnicos Cenicafé*, 393, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0393>
- Rodríguez, N., & Zambrano, D. A. (2011). Producción de alcohol a partir del mucilago de café. *Revista Cenicafé*, 62(1), 56–69. <http://hdl.handle.net/10778/496>

- Rodríguez, N., & Zuluaga, J. (1994). Cultivo de *Pleurotus pulmonarius* (Fr.) Quél en pulpa de café. *Revista Cenicafé*, 45(3), 81–92. <http://hdl.handle.net/10778/697>
- Romo, N., Toro, A. F., Flores, L. M., & Cañas, A. (2011). Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y térmicas de tallos de café y su análisis económico para la producción de pellets como biocombustible sólido. *Revista Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente*, 10, 79–91. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231122666007>
- Royse, D. (1996). Specialty mushrooms. En J. Janick (Ed.), *Proceedings of the 3rd national symposium NEWCROPS: new opportunities, new technologies* (pp. 464–475). ASHA Press.
- Salazar, J. N. (1992). La pulpa de café transformada por la lombriz es un buen abono para almácigos de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 178, 1–2. <http://hdl.handle.net/10778/947>
- Salazar, J., García, C. D., & Olaya, J. M. (1984). Dosificación de hormigones ligeros con cascarilla de café. *Ingeniería e Investigación*, 8, 51–56. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.n8.19485>
- Salvador, P. (2005). *Biomasa: Curso convenio de energías renovables*. Universidad de Valladolid.
- Sánchez, D., & Anzola, C. (2012). Caracterización química de la película plateada del café (*Coffea arabica*) en variedades Colombia y Caturra. *Revista Colombiana de Química*, 41(2), 211–225. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/39370>
- Sanz-Urbe, J. R., Guerrero, Á., Velásquez-Henao, J., Tibaduiza-Vianchá, C. A., Henao Gómez, A. F., & Ramírez, C. A. (2022). Zaranda para la separación de hojas y empaque de café en la cosecha asistida. *Avances Técnicos Cenicafé*, 541, 1–12. <https://doi.org/10.38141/10779/0541>
- Sasse, L. (1984). *La planta biogás. Bosquejo y detalle de plantas sencillas*. Braunschweig, Fredr. Vieweg & Sohn.
- Segarra, C. P. (2020). *Elementos Modulares: Una propuesta en base de fibras naturales de trigo y cascarilla de café* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Cuenca]. <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/11307>
- Sierra, J., Roque, H., & Medrano, J. (2013). Aprovechamiento de la cascarilla de café en la elaboración de materiales de construcción. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, 3(1), 7–9. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v3i1.8636>
- Silva, M. A., Nebra, S. A., Machado Silva, M. J., & Sanchez, C. G. (1998). The use of biomass residues in the brazilian soluble coffee industry. *Biomass and Bioenergy*, 14(5–6), 457–467. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)10034-4](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)10034-4)
- Suárez-Machín, C., & Guevara-Rodríguez, C. A. (2017). Levadura *Saccharomyces cerevisiae* en la alimentación de rumiantes. Revisión bibliográfica. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 51(2), 21–30.
- Tibaduiza, C. A. (2023). Observaciones del uso de la chipeadora BEAR CAT FC400 para el astillado de tallos de zoca de café [Informe Técnico]. Cenicafé. Disciplina Poscosecha.
- Toala, M. F., & Sarmiento García, V. V. (2019). *Aprovechamiento de los residuos de café (Coffea arabica) y maíz (Zea mays) para la elaboración de bolsas biodegradables* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria De Manabí Manuel Félix López]. <http://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/1194>
- Uribe-Henao, A. (1977). Fosas para pulpa de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 68, 1–6. <https://doi.org/10.38141/10779/0068>
- Uribe-Henao, A., & Salazar-Arias, N. (1983). La pulpa del café es un excelente abono. *Avances Técnicos Cenicafé*, 111, 1–6. <https://doi.org/10.38141/10779/0111>

- Valencia, G. (1972). Utilización de la pulpa de café en losalmácigos. *Avances Técnicos Cenicafé*, 17, 1–2. <https://doi.org/10.38141/10779/0017>
- Valencia, G., & Calle, H. (1968). La miel de café y su composición. *Revista Cenicafé*, 19(4), 135–139.
- Vargas-García, Y., Pazmiño-Sánchez, J., & Dávila-Rincón, J. (2021). Potencial de Biomasa en América del Sur para la Producción de Bioplásticos. Una Revisión. *Revista Politécnica*, 48(2), 7–20. <https://doi.org/10.33333/rp.vol48n2.01>
- Vargas, L. J. (2013). *Estudio del cultivo del hongo comestible Pleurotus eryngii (fries) quélet sobre subproductos generados por la actividad agroindustrial en la zona cafetera colombiana* [Tesis de pregrado]. Fundación Universitaria del Área Andina.
- Venus, J. (2013) Lactic acid fermentationbased on coffee residues. ATB. Leibniz-Institut fur Agratechnik. Potsdam-Bornim e. V.
- Vidal, M. V., Rodriguez, A., Martinez, K., Ocampo, J., & Barrios, W. (2018). Potencial de residuos agroindustriales para la síntesis de Carbón Activado: Una revisión. *Scientia et Technica*, 23(3), 411–419. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6760221>
- Villa, A. C., da Silva, R. C., Delforno, T. P., Centurion, V. B., Kimiko, I., de Oliveira, V. M., Silva, E. L., & Varesche, M. B. A. (2019). Hydrogen, alcohols and volatile fatty acids from the co-digestion of coffee waste (coffee pulp, husk, and processing wastewater) by applying autochthonous microorganisms. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (39) 21434–21450. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.115>
- Villa, A. C., da Silva, R. C., Delforno, T. P., Centurion, V. B., de Oliveira, V. M., Silva, E. L., & Varesche, M. B. A. (2020). Optimization of key factors affecting hydrogen production from coffee waste using factorial design and metagenomic analysis of the microbial community. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 4205–4222. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.062>
- Villalta, K. (2016). *Estudio de la estabilidad de un extracto rojo en polvo de la broza de café (Coffea arabica) para su aplicación como ingrediente colorante en alimentos* [Tesis de pregrado, Universidad de Costa Rica]. <https://hdl.handle.net/10669/73922>
- Yáñez, J. A. (2018). *Estudio de la película planteada del café para su reutilización en panadería*. Ecuador [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes]. <https://dspace.uniandes.edu.ec/handle/123456789/8016>
- Yoplac, I., Yalta, J., Vásquez, H. V., & Maicelo, J. L. (2017). Efecto de la Alimentación con Pulpa de Café (*Coffea arabica*) en los Índices Productivos de Cuyes (*Cavia porcellus* L) Raza Perú. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 28(3), 549–561. <https://doi.org/10.15381/rivep.v28i3.13362>
- Zadrazil, F. (1978). Cultivation of *Pleurotus*. En S. T. Chang & W. A. Hayes (Eds.), *The Biology and Cultivation of Edible Mushrooms* (pp. 521–557). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-168050-3.50031-1>
- Zambrano, D. A., & Cárdenas, J. (2000). Manejo y tratamiento primario de lixiviados producidos en la tecnología BECOLSUB. *Avances Técnicos Cenicafé*, 280, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0280>
- Zeledón, J. D., Gahona, J. J., Herrera, J., & Dicoyskiy, L. M. (2017). Macetas biodegradables de cascarilla de café para la producción de plántulas de hortalizas, Estelí, Nicaragua. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, 7(1), 18–25. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v7i1.8617>
- Zungu, V., Hadebe, L., Mpungose, P., Hamza, I., Amaku, J., & Gumbi, B. (2022). Fabrication of Biochar Materials from Biowaste Coffee Grounds and Assessment of Its Adsorbent Efficiency for Remediation of Water-Soluble Pharmaceuticals. *Sustainability*, 14(5), 2931. <https://doi.org/10.3390/su14052931>





[www.cenicafe.org](http://www.cenicafe.org)

ISBN: 978-958-8490-65-6



9 789588 490656