



Universidad del
Rosario

Escuela de Ingeniería,
Ciencia y Tecnología

**ESTUDIO DE APROVECHAMIENTO DE BIOMASA
RESIDUAL DE CAFÉ COMO FUENTE ENERGÉTICA
PARA PEQUEÑAS FINCAS CAFICULTORAS DE
COLOMBIA**

Presentado para obtener el título de

MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

RUBÉN SANTIAGO BARAJAS VILLARREAL

Dirección:

MARÍA FERNANDA GÓMEZ GALINDO, PhD

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en Energías Renovables

El presente documento, se enfoca en el aprovechamiento de la biomasa residual generada en las pequeñas fincas cafeteras del territorio colombiano en las fases del proceso que transforma la café cereza en el grano de café útil. En gran parte de estas fincas, los subproductos generados de estos procesos generan una gran cantidad de residuos que en su mayoría no reciben tratamiento y son arrojados como desecho, lo que contribuye a la contaminación orgánica de suelos y fuentes hídricas cercanas.

A pesar de la existencia de diversos desarrollos tecnológicos para la transformación de residuos a energía, para el propósito de este documento, se optó por la tecnología de digestión anaeróbica, de bajo costo y ampliamente usada en el ámbito agrícola. Los digestores anaeróbicos reciben la materia orgánica (biomasa residual), y se mantienen en unas determinadas condiciones de operación (tiempo de residencia, temperatura y pH) que permiten que las reacciones biológicas deseadas tengan lugar de manera eficiente. Algunos de los beneficios asociados a la digestión anaerobia son producción de energía renovable (biogás), si el gas se aprovecha energéticamente, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la reducción de emisiones incontroladas de CH_4 y reducción del CO_2 ahorrado por sustitución de energía fósil.

Adicionalmente la implementación de sistemas de biodigestión anaeróbica de residuos orgánicos en zonas geográficas como por ejemplo las zonas cafeteras, podría generar beneficios sociales, económicos y ambientales. Lo cual cumpliría con el objetivo del presente documento el cual es valorar técnicamente el potencial de producción de biogás a partir de la biomasa residual del café, caracterizada como fuente energética y su estudio desde las pequeñas fincas caficultoras de Colombia.

Palabras clave: Biomasa residual, Café cereza, zonas cafeteras, energías renovables, biogás, CO_2 , CH_4 , biodigestor, potencial energético.

This document focuses on the use of residual biomass generated in small coffee farms in Colombian territory in the phases of the process that transforms cherry coffee into useful coffee beans. On a large part of these farms, the byproducts generated from these processes generate a large amount of waste that mostly does not receive treatment and is thrown away as waste, which contributes to organic contamination of soils and nearby water sources.

Despite the existence of various technological developments for the transformation of waste into energy, for the purpose of this document, anaerobic digestion technology was chosen, low cost and widely used in the agricultural field. Anaerobic digesters receive the organic matter (residual biomass), and are maintained under certain operating conditions (residence time, temperature and pH) that allow the desired biological reactions to take place efficiently. Some of the benefits associated with anaerobic digestion are production of renewable energy (biogas), if the gas is used energetically, reduction of greenhouse gas emissions derived from the reduction of uncontrolled emissions of CH₄ and reduction of CO₂ saved by substitution of fossil energy.

Additionally, the implementation of anaerobic biodigestion systems of organic waste in geographical areas, such as coffee-growing areas, could generate social, economic and environmental benefits. Which would meet the objective of this document, which is to technically assess the potential for biogas production from the residual biomass of coffee, characterized as an energy source, and its study from small coffee farms in Colombia.

Keywords: Residual biomass, Cherry coffee, coffee-growing areas, renewable energy, biogas, , CO₂, CH₄, biodigester, energy potential.

TABLA DE CONTENIDO

v

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 2 OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo general.....	4
2.2 Objetivos específicos	4
Capítulo 3 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	5
Capítulo 4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	9
4.1 Biomasa como fuente energética	9
4.2 Potencial agrícola en Colombia	10
4.3 Cultivos de café y su importancia económica.....	12
4.4 Caracterización del producto	13
4.5 Problemática ambiental de los residuos del café	15
4.6 Procesos de aprovechamiento energético de la biomasa	17
4.7 Digestión Anaeróbica.....	18
4.8 Biodigestor	19
4.9 Biogás	22
Capítulo 5 METODOLOGÍA	23
Capítulo 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
6.1 Fase 1. Delimitación de la zona de análisis	26
6.2 Fase 2. Estimación del potencial de biomasa residual de café y su potencial de producción de biogás	31
6.3 Fase 3. Diseño conceptual de un biodigestor tipo para la producción de biogás para pequeñas fincas caficultoras	37
6.4 Fase 4. Delimitación de la zona de análisis, se obtuvieron los siguientes resultados:..	40
Capítulo 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
Referencias.....	47

LISTA DE TABLAS

vi

Tabla 1. Estratificación de la caficultura en el departamento de Caldas.	30
Tabla 2. Residuos obtenidos en el proceso de 1 kg de café cereza en Colombia	31
Tabla 3. Rendimiento ha/ton de café arábico en Colombia año 2022	32
Tabla 4. Rendimiento de cultivo cosechado por hectárea.....	33
Tabla 5. Valores análisis elemental – análisis próximo de mucilago de café.....	34
Tabla 6. Valores análisis elemental – análisis próximo de pulpa de café.....	34
Tabla 7. Ahorro en factura convencional de GLP por Biogás	42

LISTA DE FIGURAS

vii

Figura 1. Cultivos Agrícolas en Colombia.....	11
Figura 2. Productores de café por departamento	13
Figura 3. Composición del fruto del café	14
Figura 4. Modelos de procesamiento de café	15
Figura 5. Tecnologías de tratamientos de residuos	18
Figura 6. Biodigestor tipo chino o de cúpula fija	20
Figura 7. Biodigestor tipo hindú o de campana flotante	20
Figura 8. Biodigestor tipo taiwanés o tubular	21
Figura 9. Método mixto secuencial explicativo	23
Figura 10. Departamentos productores de café en Colombia	27
Figura 11. Épocas de la cosecha cafetera en Colombia	28
Figura 12. Fosa para biodigestor tubular	39
Figura 13. Biodigestor tipo tubular	39
Figura 14. Curva de retorno de inversión de proyecto de biodigestor tubular	43

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Cuando se evalúa la producción agrícola de un país como Colombia, y viendo el interés de los gobiernos por avanzar en las metas de transición energética, se encuentra que en la actualidad se están promoviendo los procesos de aprovechamiento energético de las fuentes no convencionales de energía; sin embargo se hace necesario exponer en un contexto académico el potencial que tiene Colombia como país agrícola, para el aprovechamiento energético de la biomasa residual de los diferentes cultivos y en especial la del proceso del café en los diferentes departamentos, lo anterior con el fin de apoyar una transición energética que incluya a las zonas menos favorecidas, las cuales usan como principal energética para la cocción de sus alimentos el gas propano.

Con los antecedentes anteriormente mencionados, en el presente documento se expone un estudio de aprovechamiento de biomasa residual de café como fuente energética para pequeñas fincas caficultoras de Colombia, tomando como referencia una finca típica cafetera pequeña, la cual representa a más del 90% de la población caficultora de Colombia. De esta manera se valora técnica y económicamente el potencial de producción de biogás a partir de la biomasa residual del café, caracterizada como fuente energética y su estudio desde las pequeñas fincas caficultoras de Colombia.

Para realizar el estudio descrito previamente, como primera medida se identificaron los municipios cafeteros con mayor producción de café por hectárea cultivada, y realizando una comparación con las zonas rurales que más usan gas propano. De esta manera se identificaron aquellos lugares que, produciendo residuos significativos, tendrían además una aplicación específica del biogás generado. La investigación se enfoca de manera consecutiva en el proceso de aprovechamiento energético de la biomasa residual del café, comenzando con la contextualización del concepto de digestión anaeróbica como una alternativa para utilizar eficientemente este recurso; este enfoque se basa en los subproductos derivados del proceso de digestión por vía húmeda del café. Por último, se

realiza el diseño conceptual de un biodigestor que cumple con la capacidad y el tamaño adecuado para suplir la demanda energética en forma de calor para la cocción de alimentos, lo anterior basado en un análisis económico en comparación al uso de gas propano

Para brindar un contexto del presente documento, se tienen en cuenta los antecedentes encontrados, con lo cual se percibe que la biomasa residual de los cultivos agrícolas en Colombia se presenta como una alternativa importante como fuente primaria para la conversión a energéticos como lo es el biogás. Se tiene también que Colombia como uno de los principales productores de café a nivel mundial presenta diversas condiciones en la biomasa residual (mucílago, pulpa), esto debido a las características propias de cada una de las zonas donde se cosecha el café. Adicional a lo anterior se tiene que, debido a las condiciones propias de las pequeñas fincas caficultoras, y al no tener los procesos tecnificados, se presenta una contaminación ambiental debido a que la biomasa residual no se aprovecha o no es tratada de manera correcta.

Para hacer un buen uso y aprovechamiento de los residuos procedentes del proceso de transformación del café, se revisaron diferentes métodos, entre las cuales se tienen las tecnologías termoquímicas y bioquímicas, de esta última se estudió el proceso de digestión anaerobia, mediante la cual y con el uso de reactores denominados biodigestores, se puede generar un energético nombrado biogás. El biogás consiste principalmente en una mezcla de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), con proporciones que varían según la composición de la materia orgánica de la que se ha originado.

Ahora bien, este estudio tiene como finalidad proponer una solución energética para la cocción de alimentos a los pequeños caficultores de los diferentes departamentos de Colombia, facilitando una alternativa para el aprovechamiento de la biomasa residual del procesamiento por vía húmeda del café, teniendo como valor agregado la descontaminación de suelos y fuentes hídricas. El aprovechamiento de los residuos que genera la industria cafetera a pequeña escala utilizando la digestión anaerobia hace uso de

residuos que de otra manera se dispondrían a cielo abierto afectando la calidad ambiental del entorno.

Por último, este estudio busca contribuir con la investigación del aprovechamiento de residuos orgánicos provenientes de procesos agrícolas, como fuentes renovables de energía, brindando un enfoque técnico y económico para acercar la transición energética a los caficultores colombianos.

Capítulo 2

OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Valorar técnica y económicamente el potencial de producción de biogás a partir de la biomasa residual del café, caracterizada como fuente energética y su estudio desde las pequeñas fincas caficultoras de Colombia

2.2 Objetivos específicos

- Delimitar los municipios cafeteros con potencial para el aprovechamiento energético de biomasa residual de café
- Estimar el potencial de generación de biogás a partir de la biomasa residual del café en las pequeñas fincas caficultoras de Colombia
- Elaborar el diseño conceptual de un biodigestor tipo para la producción de biogás para pequeñas fincas caficultoras, estimando los costos de implementación asociados

Capítulo 3

PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

A lo largo de la historia, la humanidad ha empleado procesos que hoy en día se denominan biodigestión o digestión anaeróbica, a pesar de que en su momento no se comprendían completamente los fenómenos que los subyacían debido a las circunstancias inherentes de cada época; de hecho, este proceso se lleva a cabo incluso dentro de los estómagos de los rumiantes y en los intestinos de los seres humanos. Se entiende la digestión anaeróbica como un proceso biológico, en el cual las bacterias descomponen materia orgánica como residuos agrícolas, desechos alimenticios, aguas residuales, el estiércol animal entre otros; es de anotar que los procesos de digestión anaeróbica, ocurre en ausencia de oxígeno y preferiblemente en condiciones de oscuridad, transformando estos residuos orgánicos en biogás y digestatos [1]

La digestión anaeróbica es un proceso en el cual se produce biogás y unos residuos denominados digestatos; este proceso se lleva a cabo en recipientes sellados denominados reactores o digestores, la construcción de estos reactores depende de la forma y el tamaño requerido para las condiciones de cada materia prima y lugar de operación [2]. En estos reactores se promueven una cantidad de microorganismos complejos, los cuales son producto de la inoculación inicial del reactor con desechos animales, lo que a su vez descompondrá los desechos orgánicos, dando como resultado el biogás y digestatos resultantes [3].

Ahora bien, con el fin de aprovechar al máximo la materia orgánica disponible, ésta se puede combinar con diferentes clases de materiales orgánicos biodegradables; a este tipo de mezcla se le conoce como codigestión. Los materiales codigeridos pueden ser de diferentes orígenes, tales como: estiércol, desperdicios alimentarios, residuos de cultivos agrícolas entre otros. En todo caso, la codigestión puede aumentar la producción de biogás a partir de desechos orgánicos de bajo rendimiento o difíciles de digerir [4].

Por su parte, el biogás es una mezcla gaseosa formada por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y pequeñas proporciones de otros gases, como sulfuro de hidrógeno (H_2S), hidrógeno (H_2) y amoníaco (NH_3) [5]. El biogás puede utilizarse en diferentes tipos de aplicaciones tanto a nivel industrial como a nivel residencial de pequeña escala. Entre los usos más comunes se encuentra la calefacción por combustión en calderas de vapor, generadores eléctricos, combustible de motores, incubadoras de animales y cocción de alimentos.

En Colombia y según se indicó en el congreso Naturgas 2022 que se realizó en Cartagena, en la intervención realizada por Naturgas, se sostuvo que a la fecha más de 300 municipios no cuentan con cobertura de servicio de gas natural residencial, la georreferencia de tales territorios se agrupan en su mayoría en los departamentos de Boyacá, Nariño y Santander, teniendo así, que el 43% de dichas áreas aún se encuentran desconectados de la red de suministro de este servicio público [6]. Luego, dichas poblaciones aún consumen energéticos como leña, carbón o algunos derivados del petróleo los cuales son de bajo costo, cuyos resultados desde los aspectos ambientales, económicos y de salud resultan nocivos [7].

Aunque en el panorama colombiano la Ley 1715 del año 2014, regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, y en su artículo 17 se enuncia que: “El Gobierno Nacional, en coordinación con las Corporaciones Autónomas, establecerá planes de actuación con el fin de fomentar el aprovechamiento energético de biomasa agrícola y evitar el abandono, la quema incontrolada en la explotación o el vertimiento de los residuos agrícolas” [8], aún no se encuentran proyectos rurales o de pequeña escala que aprovechen masivamente los residuos con fines energéticos.

Colombia es un país de vocación agrícola en el cual se siembran y cosechan gran variedad de productos debido su ubicación geográfica privilegiada. Dentro de estos productos, el café juega un papel relevante en Colombia por lo cual se considera al país

como uno de los mayores productores de café a nivel mundial y miembro de la *INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION* (OIC), que para el año 2020 en su informe anual, citó al país como el tercer productor de café con una producción de 13,9 millones de sacos, solo superado por Vietnam y Brasil [9]. Lo anterior evidencia la importancia de estos cultivos a nivel nacional y su posible impacto en la generación de biomasa residual, la cual no tiene un tratamiento para disposición final en este tipo de productos.

Es de anotar que, según el mapa de caficultores colombianos, la siembra del café ocupa en promedio una extensión de terreno de 974.000 hectáreas, las cuales están distribuidas en diversas áreas del territorio colombiano, pero que se concentran en los departamentos de Nariño, Norte de Santander, Antioquia, Valle del Cauca, Cundinamarca, Huila, Cauca, Tolima, Caldas, Quindío y Risaralda, conocidos los cuatro últimos como el Eje Cafetero [10]. Debido a la distribución geográfica de los cultivos, la altura y diferentes pisos térmico, se produce una variación en el tono, sabor y olor del café, esto debido a que los cultivos se encuentran en diferentes departamentos y municipios del país, lo que a su vez genera variaciones del producto final.

La distribución de los caficultores se da en tres categorías, dependiendo del número de hectáreas de las fincas productoras: aquellas con fincas cuya extensión es mayor a 10 hectáreas son considerados grandes caficultores, en tanto que fincas con áreas entre, entre 5 y 10 hectáreas son considerados medianos. Los caficultores que trabajan áreas cultivadas de menos de 5 hectáreas son pequeños [11]. Es de anotar que según datos de referencia de la Federación Colombiana de Cafeteros más de un 90% de las fincas se encuentran en la categoría de pequeños caficultores, esto debido a que en la mayoría de los casos la siembra se hace en una extensión de terreno que oscila entre 1.3 a 4 hectáreas para la producción de café [12].

En lo que atañe al proceso de producción del café se tiene que existen unos procesos para lograr el producto final. Dicho proceso se divide en cinco etapas, de las cuales, los pequeños caficultores realizan los primeros tres procesos plantación, cosecha y despulpado

[13]. Posterior a la cosecha, y para poder separar la semilla de los demás componentes (residuos), se pueden emplear dos diferentes métodos, el primer método denominado vía seca que consta de tres etapas y un segundo método que se denomina por vía húmeda (café lavado) este segundo método consiste en siete pasos [14]; el grano de café al ser despulpado utilizando el método por vía húmeda, deja una capa gelatinosa que recubre la semilla, llamada mucílago de café; una vez finalizado el proceso, se clasifica el producto obtenido mediante criterios de calidad, tamaño de grano, color entre otros.

De los procesos anteriormente mencionados, se originan unos residuos, como por ejemplo tallos, pulpa, cascarilla, mucilago entre otros, los cuales representan el 92% del peso del café cereza; esta biomasa residual en la mayoría de los casos no recibe ningún tratamiento suplementario y es arrojada como desecho en las fincas, aportando a la contaminación orgánica de suelos, afectando también las fuentes hídricas cercanas, y con ello la biodiversidad de los ecosistemas. Finalmente, la descomposición de las aguas residuales de los procesos de despulpado genera también olores pestilentes gases contaminantes [15].

Hasta aquí se encuentran dos circunstancias que pueden tener correlación: la primera, obedece a que en los sitios donde se siembra café, se cuenta con una cantidad de residuos propio del proceso y con un contenido energético significativo. Simultáneamente, se observa que en dichas zonas el servicio público de gas domiciliario no ha tenido la cobertura esperada; a nivel de municipios, son 364 los que no cuentan con el servicio de gas natural, 43 % de los cuales pertenecen a tres departamentos: Nariño, con 63; Boyacá, con 48 y Santander, con 46, como se muestra en el censo nacional de población y vivienda del DANE [16]. En paralelo a lo anterior, se cuenta con la biomasa residual del procesamiento del café la cual puede ser aprovechada como una fuente alternativa para la generación energéticas tales como el biogás, atendiendo así una necesidad puntual de las zonas.

Capítulo 4

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

4.1 Biomasa como fuente energética

La biomasa es la fracción biodegradable de los residuos y desechos de origen biológico procedentes de actividades agrarias de origen vegetal y de origen animal, del mismo modo son una fracción biodegradable de los residuos producidos por actividades industriales y comerciales de origen biológico. La biomasa es, por tanto, materia orgánica utilizada como fuente energética ya que abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se caracteriza por su heterogeneidad, formada principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno, dichos compuestos son los que reaccionan liberando energía a su entorno, generalmente en forma de calor [17].

La caracterización de la biomasa permite, mediante diversas técnicas, conocer su composición fisicoquímica. El análisis próximo: involucra determinar en la sustancia su materia volátil, carbono fijo y ceniza; análisis último o elemental: es el porcentaje en peso de oxígeno (O), carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S) y nitrógeno (N); análisis próximo: evalúa el contenido de carbono fijo, material volátil y cenizas; el análisis estructural: hace referencia a cuantificar el contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa [18]. Actualmente, con tecnologías muy diversas, se extrae la energía de estos residuos, mediante tratamientos que además contribuyen a reducir los problemas medioambientales que generan.

La valorización de la biomasa con fines energéticos puede hacerse a través de procesos termoquímicos y bioquímicos (ver sección **Procesos de aprovechamiento energético de la biomasa**); dentro de los primeros están la combustión, pirólisis, gasificación y dentro de los segundos está la digestión que da como resultado un biogás y la fermentación (termina en alcohol). Además, en los últimos tiempos, la conversión de residuos agrícolas y biomasa para producir bioenergía útil se ha convertido en una tecnología atractiva y prometedora, lo anterior se debe al corto período de reacción, una

gama diversa de productos, emisiones de CO_2 limitadas, flexibilidad en la retroalimentación, costos de capital y procesamiento reducidos, además de su potencial de comercialización.

4.2 Potencial agrícola en Colombia

El sector agrícola es uno de los estándares principales en la economía de colombiana, la cual se basa en la producción de bienes primarios como lo son el café, el ganado, la caña de azúcar, las flores, los anteriores productos todos con fines de exportación, por otra parte, se producen bienes de consumo para el mercado interno. Sin embargo, el agro fue uno de los sectores que más ganó terreno durante pandemia, no solo porque en medio de un decrecimiento de 7% del PIB real nacional, el sector agrícola creció 2,3%, sino porque evitó una crisis aún peor para la economía del país; ya para el año 2021 mientras que el PIB crecía 11%, el sector llegó a 3,1%, lo anterior según el portal del Ministerio de Agricultura colombiano (Agronet) [19].

Según datos del Agronet, Colombia cuenta con una extensión de tierra de más de 100 millones de hectáreas, de éstas el potencial agrícola representa en promedio el 35%, sin embargo, en el año 2021 se registraron 5,3 millones de hectáreas sembradas, esto quiere decir que tan solo se aprovecha un 13% del potencial total [20]. Según el informe de la Evaluación Agropecuarias Municipales (EVA) para el año 2022, y realizado por la Unidad de Planeación Rural Agropecuaria, (UPRA), las áreas sembradas en el año 2021 disminuyeron un 1,2% en comparación con la siembra en 2020 [21]. La reducción experimentada se originó en respuesta a los significativos desafíos a los que se vio sometida la actividad agropecuaria en el año 2021. Estos desafíos surgieron como consecuencia del aumento en los costos de las materias primas, así como de las fluctuaciones en la tasa de cambio

Estas circunstancias han afectado la estructura de costos de producción en los diferentes sectores productivos, lo que ha tenido efectos negativos en los precios al

consumidor y el ingreso de los productores, sin embargo, se garantizó el abastecimiento de alimentos en el país. Según los datos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y teniendo como histórico los años 2007 a 2018, se relacionó la producción agrícola nacional, teniendo que los cultivos agrícolas que más extensión de tierra tienen son los denominados cultivos tropicales; en el top 3 de este grupo se encuentra: el café con 9.088.495 hectáreas, la combinación de frutas y legumbres con 6.849.132 hectáreas y el maíz con 6.700.897 hectáreas, así como se muestra en la figura 1 [22]. Estos tres grupos representan más del 45% de los cultivos en Colombia.

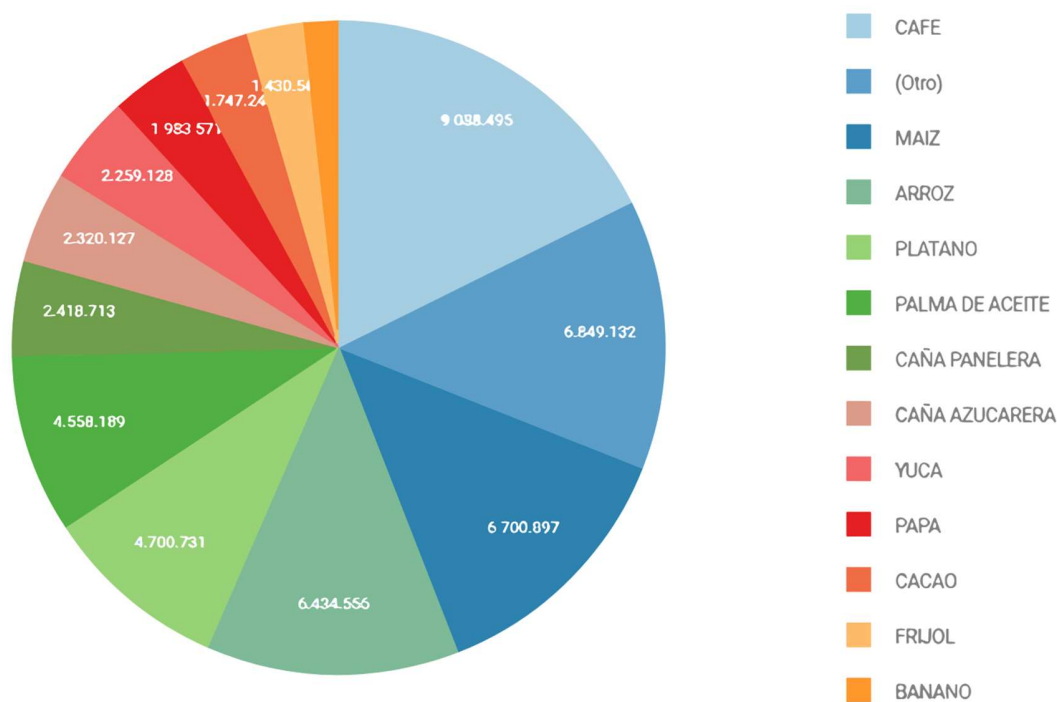


Figura 1. Cultivos Agrícolas en Colombia

Fuente: [22]

4.3 Cultivos de café y su importancia económica

Teniendo en cuenta que en Colombia el principal producto agrícola que se cosecha es el café, y como se indica en el informe de gestión de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC), en promedio 542.743 familias dependen económicamente de estas labores. Estas actividades se realizan en 991.238 hectáreas cultivadas, donde el 96 % de los cultivos están en fincas de menos de 5 hectáreas [23]. Según el mismo informe en el año cafetero 2021/22, la producción nacional fue de 11,7 millones de sacos de 60 kg de café verde, 12,8% menos frente a 2020/21. Esa caída fue producto, principalmente, de las condiciones climáticas poco favorables para el cultivo de café que golpearon al país a lo largo del año. En 2021, la cantidad de café verde consumido en el país alcanzó 2 millones de sacos lo que representa 140.000 toneladas, toda vez que cada saco de café contine 70 kg. El consumo interno, si bien disminuyó con respecto al atípico año 2020, conserva la tendencia de crecimiento que tenía antes de la pandemia.

Según el Boletín Estadístico Sectorial Agropecuario del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) En 2021, se observa que los departamentos con mayor participación sobre el total nacional de productores son Cauca (17 %), Huila (16 %), Antioquia (14 %) y Tolima (11 %); estos departamentos concentran el 58 % de la producción. Del mismo modo, la estimación de producción total mensual de café verde en sacos de 60 kg proveniente de los 23 departamentos del país se realiza a partir de los datos de exportaciones, importaciones, consumo e inventarios de café del mes a calcular. El café verde se define como los granos de café antes de ser tostados, otras formas de café se convierten para ser expresadas en esta unidad [24].

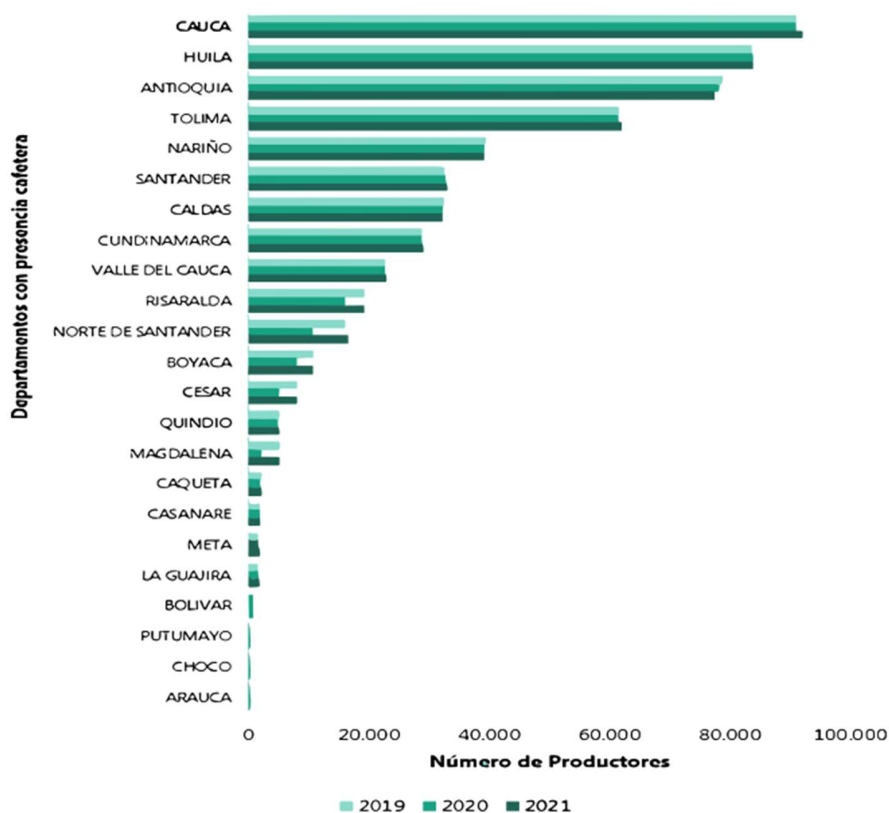


Figura 2. Productores de café por departamento

Fuente: [24].

4.4 Caracterización del producto

El cafeto es un árbol que puede alcanzar alturas de hasta 10 metros, pero en el proceso de cultivo se limita su crecimiento a no más de 3 metros para facilitar la recolección del fruto; el árbol de café florece y produce frutos en un período de tres o cuatro años, el fruto del café es conocido como cereza, es de tamaño reducido, forma redondeada y adquiere un color rojo intenso cuando alcanza la madurez. Del procesamiento del café, solo se aprovecha entre un 5% a un 8% en la creación de la bebida, mientras que en el excedente se incluyen varios elementos los cuales se pueden apreciar en la figura 3; entre los cuales se encuentra el pergamino, película plateada, cascara o pulpa y mucílago o baba, estos últimos se generan durante el proceso de extracción de la semilla. [25]

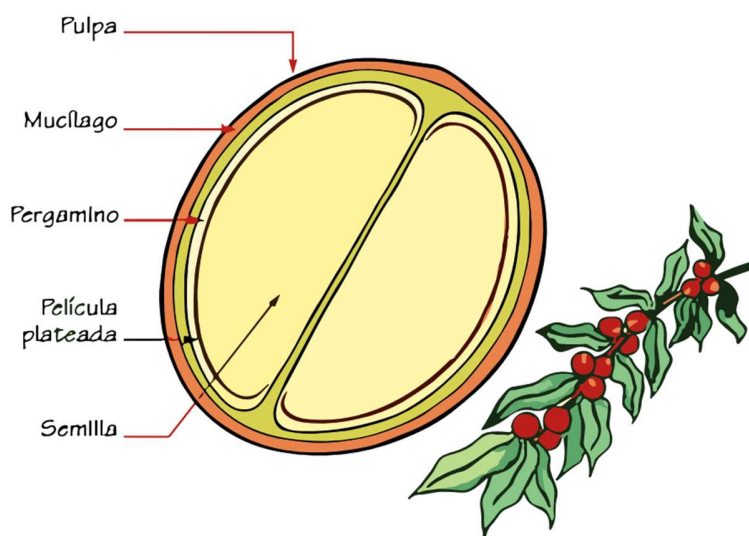


Figura 3. Composición del fruto del café

Fuente: [25]

Para poder separar la semilla de los demás componentes (residuos), se pueden emplear dos diferentes métodos, el primer método denominado vía seca consta de tres etapas clasificación y limpieza, secado y descascarillado; en el proceso de secado las cerezas de café se exponen al sol durante aproximadamente cuatro semanas, durante ese tiempo se van rastrillando o volteando manualmente para que se sequen por igual y alcancen una humedad final máxima de 12,5 %. En la etapa de descascarillado, las cerezas secas se almacenan a granel en silos diseñados específicamente hasta que sean enviadas al molino. Una vez en el molino, se utiliza una descascaradora para retirar todas las capas exteriores de las cerezas secas. Posteriormente, se separan, clasifican y empacan en sacos.

Ahora bien, para los cafés de tipo Arábicos se utiliza generalmente el método por vía húmeda (café lavado) este segundo método consiste en siete pasos: limpieza y selección, descascarillado, cribado, lavado y separación, fermentación, lavado y secado; la operación de descascarillado representa la principal diferencia entre los dos métodos. En el de vía húmeda el despulpado lo hace una máquina que aprieta las cerezas entre planchas fijas y movibles, ajustadas para que no se dañen los granos [26]. La carne (mucílago) y la piel (pulpa) del fruto quedan separados de los granos que aún se encuentran recubiertos con el

pergamino. El descascarillado deberá hacerse lo más pronto posible después de la recolección para evitar que el fruto se deteriore y afecte a la calidad del grano [27].

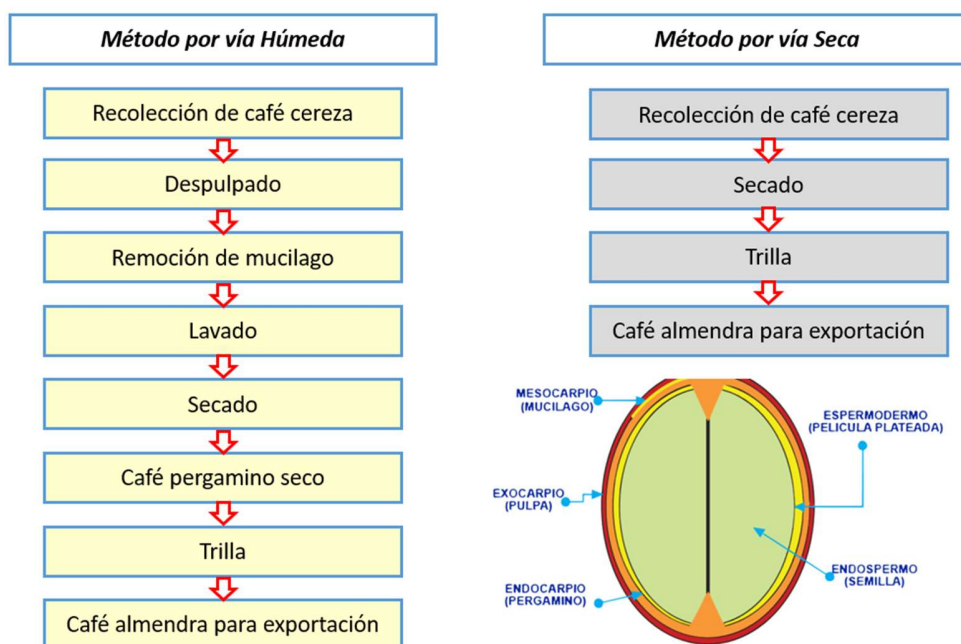


Figura 4. Modelos de procesamiento de café

Fuente: [27]

4.5 Problemática ambiental de los residuos del café

Como país productor de café, Colombia presenta una problemática ambiental relacionada con los residuos propios del proceso de transformación del fruto del café. Lo anterior debido a que la mayoría de los procesos se llevan a cabo de manera no tecnificada, puesto que como se explicó anteriormente, el 96% de las fincas productoras de café pertenecen a los pequeños caficultores; los procesos más representativos y de los cuales se produce la mayor cantidad de residuos son el despulpado, remoción del mucílago por fermentación natural, lavado y secado, de estas actividades surgen subproductos como por ejemplo cascarillas, pulpa y en ocasiones aguas fermentadas, las cuales aportan a la contaminación de cuerpos de agua, como también de suelos.

La práctica de poscosecha en Colombia utiliza el beneficio por vía húmeda, el cual comprende el despulpado, la remoción del mucílago (por fermentación natural o remoción mecánica), lavado y secado. El proceso de despulpado consiste en retirar la pulpa de la cereza por medio de presión que ejerce la camisa de la despulpadora y debe iniciarse inmediatamente después de que se cosechan los frutos; posteriormente la remoción del mucílago (mesocarpio) se realiza por medio de la fermentación del grano en tanques de fermentación o por medios mecánicos [28]. La fermentación puede durar de 12 a 18 horas, dependiendo de variables como la temperatura del lugar, el uso de agua y la cantidad de mucílago en el grano.

Según el informe técnico N°6 de Cenicafé publicado en el año de 1977, la pulpa y el mucílago constituyen los subproductos más abundantes del proceso de beneficio húmedo del café (proceso en el cual se utiliza agua para el despulpado, desmucilaginado o la fermentación y el lavado) y representan alrededor del 60% del peso del fruto fresco [29]. Cuando no se realiza una disposición final o un aprovechamiento a estos subproductos, se puede generar la mayor fuente de contaminación ambiental en la zona cafetera. Se ha calculado que la pulpa y el mucílago generados durante el beneficio húmedo del café, para la obtención de una arroba de café pergamino seco, producen una contaminación equivalente a la generada por los excrementos y orina de 100 personas en un día [30].

Con el fin de minimizar el impacto ambiental relacionado con el vertimiento de agua y los residuos suspendidos en los procesos de la despulpada, es necesario generar planes de acción para disminuir la carga contaminante proveniente de los vertimientos de este proceso. Para lo anterior se hace necesario que las familias cafeteras estén conscientes de las problemáticas ambientales relacionadas con su labor diaria e implemente prácticas eficientes para el buen manejo de los subproductos, y así generar un aprovechamiento energético de los residuos del café (mucílago), con la finalidad de obtener un biogás que pueda satisfacer la demanda energética de gas domiciliario, y así, cubrir los procesos domésticos internos los cual genera uno de los índices de necesidades básicas insatisfechas de las fincas cafeteras de algunos de los departamentos de Colombia.

Con lo anterior, se tiene que la concientización y políticas internas sobre la contaminación no han tenido la acogida esperada por parte de los caficultores, dado que no se promueve la búsqueda de usos para los subproductos (pulpa – mucilago). También se cuenta como parte de la problemática que la integración de tecnologías renovables enfrenta obstáculos, tales como: falta de incentivos gubernamentales, desconocimiento del potencial real para las energías renovables y de la viabilidad de despliegue de las tecnologías.

4.6 Procesos de aprovechamiento energético de la biomasa

A pesar de los desarrollos tecnológicos recientes, y de los enfoques de la transformación de residuos a energía o *Waste-to-Energy* (WTE), los cuales consideran factores ambientales y de sostenibilidad y son procesos fundamentales para la generación energética, la implementación de WTE en contextos reales es bastante escasa. Ahora bien, los residuos orgánicos sin clasificar (biomasa residual de cultivos) se pueden dividir en fracciones para aplicaciones de procesos WTE, como lo son la gasificación de residuos orgánicos o la digestión anaeróbica (DA). Lo anterior dependerá de factores como la ubicación geográfica, origen y caracterización de los residuos, costos operativos, eficiencia de la tecnología, entre otros.

En la actualidad, los principales métodos de tratamiento de residuos se pueden categorizar en tres tipos; rellenos sanitarios, tratamientos biológicos y tratamientos térmicos [31]; en la figura 5 se pueden apreciar las metodologías expuestas por los autores Tan et al. (2015) y Tozlu et al. (2016), los cuales exponen que las opciones para el tratamiento térmico de WTE usan altas temperaturas para convertir materia prima de residuos en electricidad, calor y productos de valor agregado. El tratamiento biológico de WTE convierte los residuos orgánicos en energía a modo de combustibles líquidos o gaseosos mediante el uso de agentes biológicos. Para la última metodología, la cual es los rellenos sanitarios, se utiliza la recuperación de gas metano (CH_4), con lo cual también puede generar electricidad y calor por medio de turbinas [32]

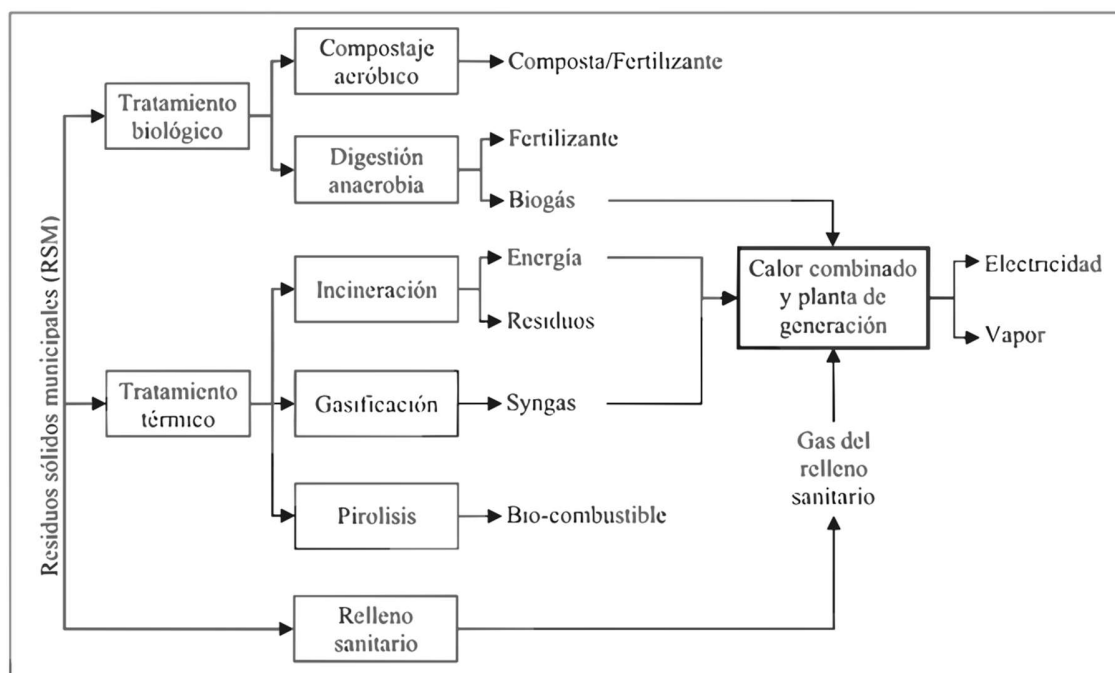


Figura 5. Tecnologías de tratamientos de residuos

Fuente: [31]

4.7 Digestión Anaeróbica

Los procesos de descomposición biológica en ausencia de oxígeno, conocidos como anaerobios, que posibilitan la generación de biogás a partir de materia orgánica, ocurren tanto en vertederos como en sistemas cerrados ampliamente reconocidos como digestores anaerobios (AD). Estos digestores anaerobios son abastecidos con materia orgánica, también denominada biomasa residual, y se mantienen en condiciones específicas de operación, tales como el tiempo de residencia y la temperatura, entre otros parámetros [33]. A fin de maximizar la producción de biogás en los digestores, es una práctica común combinar diversos tipos de sustratos en un proceso denominado co-digestión, con un énfasis particular en seleccionar una mezcla que facilite la ejecución sin obstáculos de los procesos biológicos. Esto implica asegurarse de que los sustratos mezclados no inhiban el desarrollo de las reacciones biológicas necesarias [34].

La digestión anaeróbica puede aplicarse a residuos agrícolas o excedentes de cosechas, dichos residuos se pueden tratar de forma independiente o combinados, a este último se le denomina co-digestión. La digestión anaerobia se revela como un proceso apropiado para el tratamiento de aguas residuales con una elevada carga orgánica, como es característico en numerosas industrias alimentarias. Entre los beneficios asociados a la digestión anaerobia se destacan la notable disminución de malos olores, la generación de energía renovable si se aprovecha el gas resultante, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero gracias a la reducción de emisiones incontroladas de metano (CH_4), así como la reducción de dióxido de carbono (CO_2) mediante la sustitución de energía fósil [35]. Adicionalmente la implementación de sistemas de gestión integral de residuos orgánicos por zonas geográficas (zonas cafeteras), podría generar beneficios sociales, económicos y ambientales.

4.8 Biodigestor

Un biodigestor es un recipiente cerrado herméticamente en el que se produce biogás a partir de la descomposición de materia orgánica en un medio acuoso. El proceso de descomposición es realizado por microorganismos, como hongos y bacterias, que crecen en ausencia de oxígeno [36]; el biodigestor es una tecnología sencilla, eficiente y de bajo costo que permite solucionar el manejo de residuos sólidos, generando biogás y digestatos, este último es utilizado como un fertilizante orgánico. Los biodigestores son una opción viable para hogares rurales que buscan una fuente de energía renovable y barata [37].

Los biodigestores anaerobios se clasifican, diseñan e implementan en función de la escala del proceso, el presupuesto, las condiciones climáticas y topográficas, y la disponibilidad de terreno. La diferencia fundamental entre los diferentes tipos de digestores anaerobios es que el proceso de digestión ocurre de manera ligeramente diferente en cada uno, dependiendo de su funcionamiento, forma y materiales de construcción [38]. Por lo tanto, este estudio se centró en sistemas de biodigestión de tecnología intermedia, de

funcionamiento semi-continuo y de bajo costo; esto permitirá a los caficultores interesados elegir la mejor opción disponible para sus necesidades.

Los biodigestores semi continuos son los más utilizados en todo el mundo por su fácil acceso, instalación y bajo costo. Se componen de una cámara de fermentación, donde ocurre la digestión anaerobia, un espacio para el almacenamiento del gas, y dos cajas para alimentar el biodigestor y sacar el digestatos [39]. Dentro de este grupo, se distinguen tres modelos populares: el chino o de cúpula fija (figura 6), el hindú o de campana flotante (figura 7), y el taiwanés o tubular (figura 8) [40].

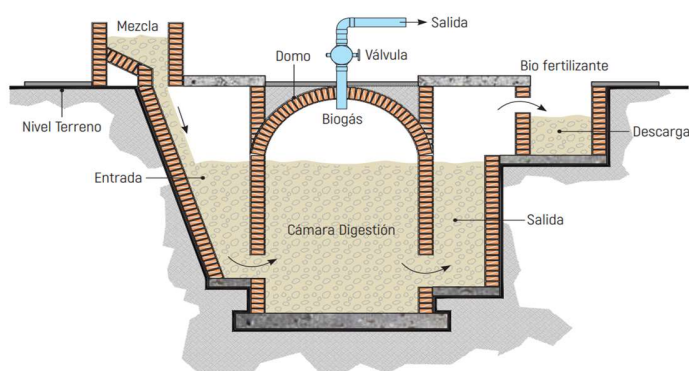


Figura 6. Biodigestor tipo chino o de cúpula fija

Fuente: [40].

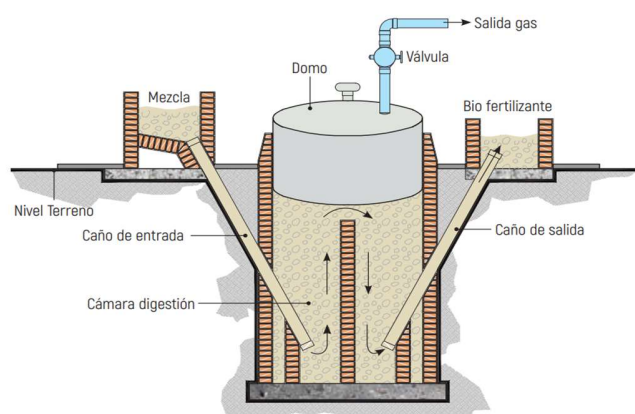


Figura 7. Biodigestor tipo hindú o de campana flotante

Fuente: [40].

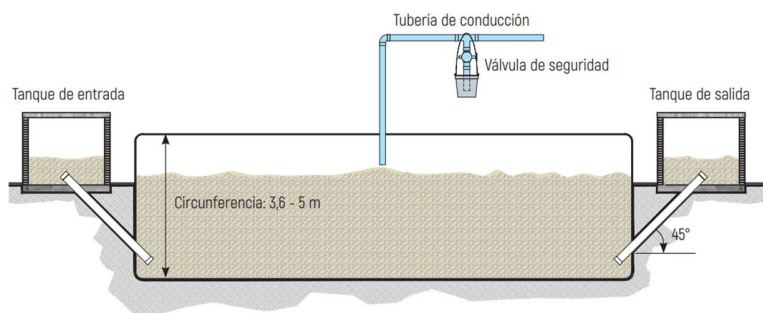


Figura 8. Biodigestor tipo taiwanés o tubular

Fuente: [40].

En la tabla 1, se presentan una comparación de los tres tipos de biodigestores expresados anteriormente, donde el biodigestor tubular de flujo continuo o tipo Taiwán es el sistema más económico de los tres modelos semi continuos, esto se debe a que está elaborado en plástico o geotextil, lo que reduce la necesidad de mano de obra y materiales de construcción, sin embargo, el plástico o geotextil deberá tener un grosor superior a los 0,75 mm, presentando una durabilidad para el plástico de entre 5-7 años si están protegidos y para el geotextil una durabilidad de 10 a 15 años [41]. Adicionalmente estos biodigestores se construyen generalmente semienterrado, lo que requiere una zanja menos profunda y, por lo tanto, no necesita sistemas de contención ni recubrimientos costosos.

Tipo de Biodigestor	Cúpula Fija	Campana Flotante	Tubular
Costo Inicial	Alto	Medio	Bajo
Costo Operativo	Alto	Medio	Bajo
Material	Concreto, Ladrillo, Fibra de Vidrio	Concreto, Ladrillo, Geomembrana	Geomembrana
Volumen	10 - 1000 m ³	10 - 500 m ³	2 - 200 m ³
Ventajas	Fácil construcción, Bajo mantenimiento, Mayor vida útil	Mayor eficiencia, Menor espacio, Fácil operación	Alta eficiencia, Alta producción de biogás
Desventajas	Baja eficiencia, Baja producción de biogás	Mayor complejidad de construcción	vida útil promedio de 7 – 15 años

Tabla 1. Comparación de biodigestores semi continuos

Fuente: [39], [40], [41]

4.9 Biogás

El biogás consiste principalmente en una mezcla de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), con proporciones que varían según la composición de la materia orgánica de la que se ha originado. [42]. Su composición, que depende del sustrato digerido y del tipo de tecnología utilizada, puede ser la siguiente: 50-70% de metano (CH_4), 30-40% de dióxido de carbónico (CO_2), $\leq 5\%$ de hidrógeno (H_2), ácido sulfhídrico (H_2S), y otros gases. Debido que el biogás contiene un alto contenido en metano (CH_4), tiene un poder calorífico algo mayor que la mitad del poder calorífico del gas natural [43]. Un biogás con un contenido en metano (CH_4) del 60% tiene un poder calorífico de unas $5.500 \frac{Kcal}{Nm^3}$ ($6,4 \frac{KWh}{Nm^3}$) [44].

De manera paralela la digestión anaeróbica produce un subproducto denominado digestato, el cual suele tener un alto contenido de compuestos orgánicos como también elementos como lo son el nitrógeno, fósforo, potasio y en ocasiones algunos compuestos metálicos; la anterior composición estará dada de acuerdo con las características propias de la biomasa tratada en el biodigestor [45]. El digestato, al ser un insumo, puede contribuir a recuperar los suelos y ayudar en el crecimiento de los cultivos mediante la liberación de nutrientes, adicional a esto, pueden ser devueltos al medio ambiente en forma sin degradar las condiciones de los suelos [46].

Capítulo 5

METODOLOGÍA

La metodología que se empleará para desarrollar lo arriba indicado, tomará como referencia el método mixto secuencial explicativo como un marco para la resolución de problemas de investigación. El objetivo principal del método mixto secuencial explicativo es utilizar las fortalezas de ambos enfoques (cualitativo y cuantitativo) para compensar las limitaciones de cada uno, proporcionando así una comprensión más sólida y holística del fenómeno de estudio [47]. Esta secuencia específica permite que los resultados de una fase informen y enriquezcan la siguiente, brindando una perspectiva más completa y robusta. A continuación, se presenta un diagrama de las fases del método mixto secuencial explicativo:

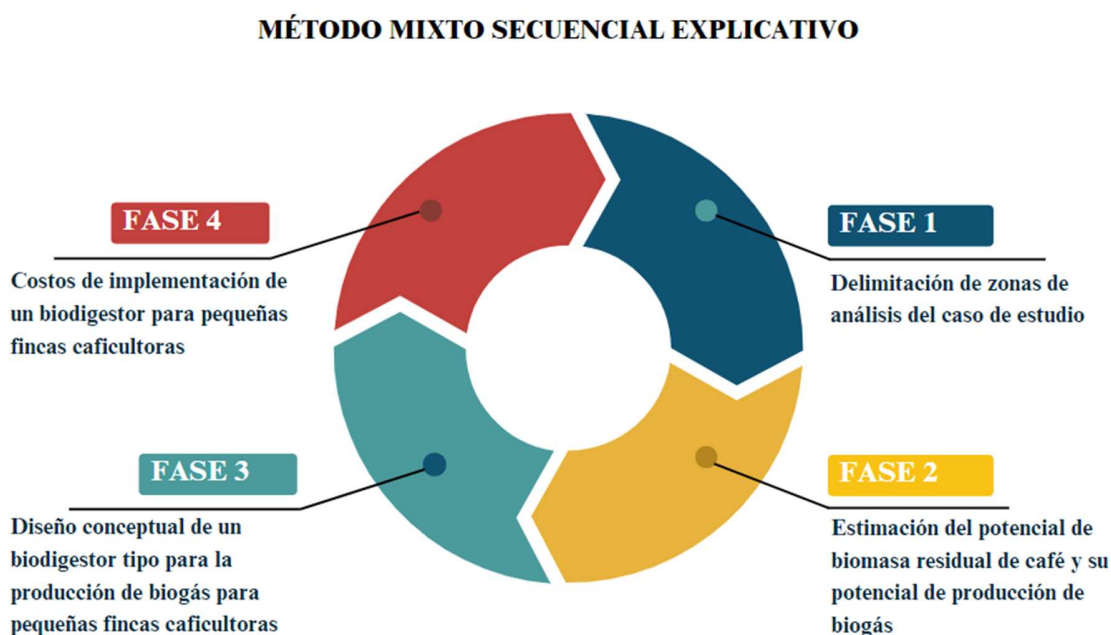


Figura 9. Método mixto secuencial explicativo

Fase 1. Delimitación de zonas de análisis del caso de estudio

Esta fase se lleva a cabo mediante un método cuantitativo, los datos se pueden utilizar para identificar las zonas de estudio que tienen el mayor potencial para la producción de biogás a partir de biomasa residual de café, para esta fase se utiliza una representación gráfica y basado en el principio de Pareto, identificar cual es el departamento que cuenta con un potencial medio de producción de café.

Fase 2. Estimación del potencial de biomasa residual de café y su potencial de producción de biogás

Esta fase se desarrolla mediante un método cuantitativo, comparando el análisis elemental de la biomasa residual a partir de la bibliografía disponible. Los datos cuantitativos se utilizan para estimar la cantidad de biomasa residual de café disponible en las zonas de estudio y su potencial para la producción de biogás. Lo anterior se realiza mediante el estimado de utilización de café cereza con relación a la biomasa residual generada en el proceso por vía húmeda del café.

Teniendo el análisis elemental teórico, se aplica una relación estequiométrica calculando la composición mol del elemento; posteriormente se determinan los valores en relación con el CH_4 y CO_2 . Para determinar el valor teórico del volumen de dióxido de carbono CO_2 y el metano CH_4 , se utilizan las fórmulas matemática $Volumen\ de\ CH_4 = \frac{CH_4 * peso\ de\ la\ muestra}{MOBR * densidad\ CH_4}$ y $Volumen\ de\ CO_2 = \frac{CO_2 * peso\ de\ la\ muestra}{MOBR * densidad\ CO_2}$.

Fase 3. Diseño conceptual de un biodigestor tipo para la producción de biogás para pequeñas fincas caficultoras

Esta fase se lleva a cabo mediante una combinación de los métodos cuantitativos y cualitativos, como el análisis de la información emitida por entidades especializadas. Los datos cuantitativos se utilizan para recopilar información sobre las necesidades de las

pequeñas fincas caficultoras, y los datos cualitativos para obtener información como las condiciones in situ; y así poder diseñar el tamaño y la capacidad del biodigestor de acuerdo con el potencial de biomasa residual estimado.

Fase 4. Costos de implementación de un biodigestor para pequeñas fincas caficultoras

Esta fase se lleva a cabo mediante un método cuantitativo (análisis de costos). Los datos se utilizan para estimar los costos de implementación de un biodigestor para pequeñas fincas caficultoras.

Capítulo 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Fase 1. Delimitación de la zona de análisis

Para el presente caso de estudio se consideraron las características geográficas, clima, y de acceso a la cobertura de gas natural residencial de las fincas caficultoras; lo anterior con el fin de realizar estimaciones para el aprovechamiento de biomasa residual de café como fuente energética para pequeñas fincas caficultoras de Colombia. La descripción de este estudio coincide que un país agrícola como Colombia, no debería relegar o restar importancia a la biomasa residual como una fuente de aprovechamiento energético a baja escala para la transición energética.

Zonas cafeteras

Colombia como uno de los principales exportadores de café a nivel mundial, cuenta con cerca de 9.088.495 hectáreas para la producción de café, esto quiere decir que casi un 8% del territorio nacional está dedicado al proceso productivo de este producto [48]. La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia censó 563 municipios productores en el país; lo que a su vez denota que de los 32 departamentos en los cuales está dividido el territorio colombiano, 23 son productores de café con diferentes perfiles del producto (notas de sabor, acidez, cuerpo) como se muestra en la figura 10. Los resultados también muestran que en Colombia existen más de 518 mil caficultores, de los cuales el 94% tienen menos de 5 hectáreas en café.

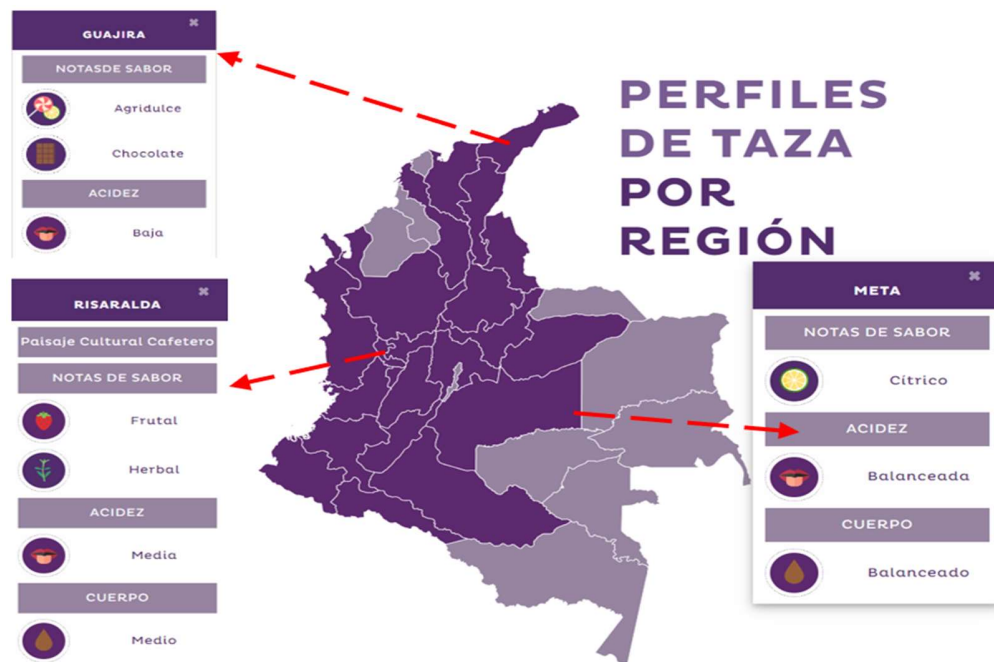


Figura 10. Departamentos productores de café en Colombia

Fuente: [49].

En la mayoría de las fincas cafeteras de Colombia se producen granos de la planta Coffe Arábica L, la cual cuenta con una variedad de tipos de cafeto que se siembran en los suelos de las regiones cafeteras como los son: Típica, Bourbon, Caturra, Maragogipe y Variedad Colombia. Esta última fue creada por el Centro de Investigaciones de Café, Cenicafé, para que este tipo de planta fuese resistente a la roya, una enfermedad que afecta los cultivos. Aunque es un producto propio de la zona tropical, su cultivo exige, además, condiciones especiales de suelo, zonas templadas entre los 17 y 23 grados centígrados, precipitación atmosférica cercanas a los 2000 milímetros anuales distribuidos a lo largo del año y altitud que varías desde los 1200 metros hasta los 1800 metros sobre el nivel del mar [49].

Considerando como factor primordial la variación climática y el ambiental de cada una de las regiones cafeteras de Colombia para este tipo de cultivos, la época de siembra determina la dinámica de crecimiento y desarrollo de la planta de café, adicionalmente la distribución de la lluvia ayuda en una gran medida al ciclo vegetativo y reproducción de

las plantas de cafeto. Para conocer el clima de una región se miden y estudian los elementos que lo componen, las variantes más utilizadas son: la radiación solar, el brillo solar, la temperatura, la lluvia y los vientos. Además, por medio de las lluvias que caen y el agua que se evapora y la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo se calcula el balance hídrico, el cual permite conocer las épocas en las cuales no hay agua disponible para el cultivo o, por el contrario, las épocas en que se presenta un exceso de agua que pueda perjudicar su normal desarrollo.

Teniendo en cuenta la información de la figura 11 “épocas de la cosecha cafetera en Colombia”, tomada de la página de la federación nacional de cafeteros, se tiene que la siembra de cafeto se realiza en el primer semestre del cada año en los departamentos de Quindío, Boyacá, Santander, Magdalena, Guajira, Cesar, Antioquia, Norte de Cundinamarca, Cordillera Oriental del Huila, Caldas, Risaralda, norte del Tolima y zona norte del valle del Cauca. Ahora bien, para los departamentos del Cauca, Nariño, centro y sur de Cundinamarca, Norte de Santander, Cordillera Central del Huila, zona sur del Tolima, zona sur del Valle del Cauca, la época más recomendable para efectuar las siembras de café es el segundo semestre del año.

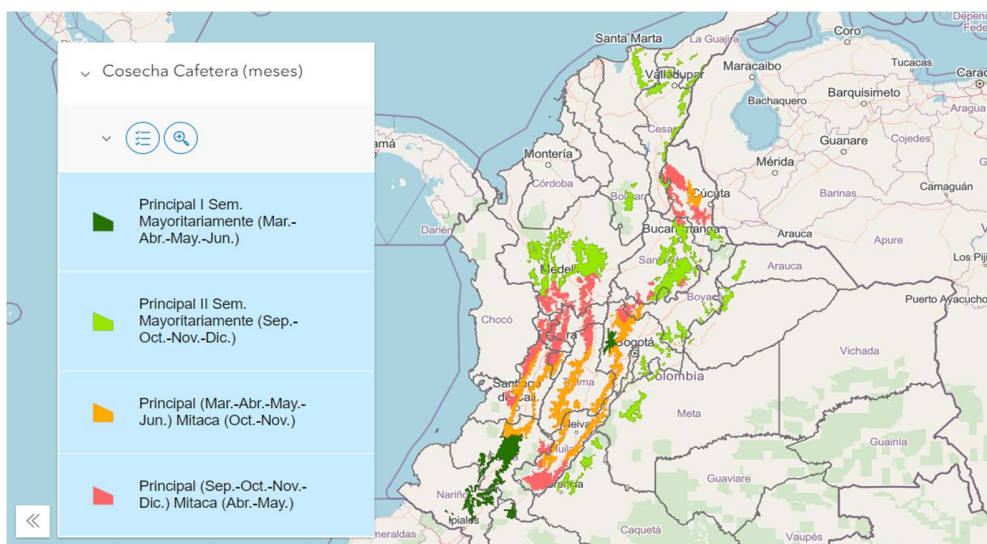


Figura 11. Épocas de la cosecha cafetera en Colombia

Fuente: [50]

Teniendo una claridad de las épocas de las cosechas de café en los diferentes municipios, e identificando que no todas las zonas cafeteras conservan las mismas características climatológicas y geográficas; se identifica también una variación importante en las áreas cultivadas por departamento, siendo el Huila la zona con mayor número cultivos llegado a las 145740 hectáreas. Los departamentos con mayor número de hectáreas cultivadas son Huila, Antioquia, Tolima, Cauca y Caldas, alcanzando el 62% de las zonas cultivadas; por otra parte, los departamentos con menor número de cultivos son Arauca, Chocó, Putumayo, Bolívar y Casanare, teniendo solo un 0,4% de zonas cultivadas [51], como se muestra en la figura 12.

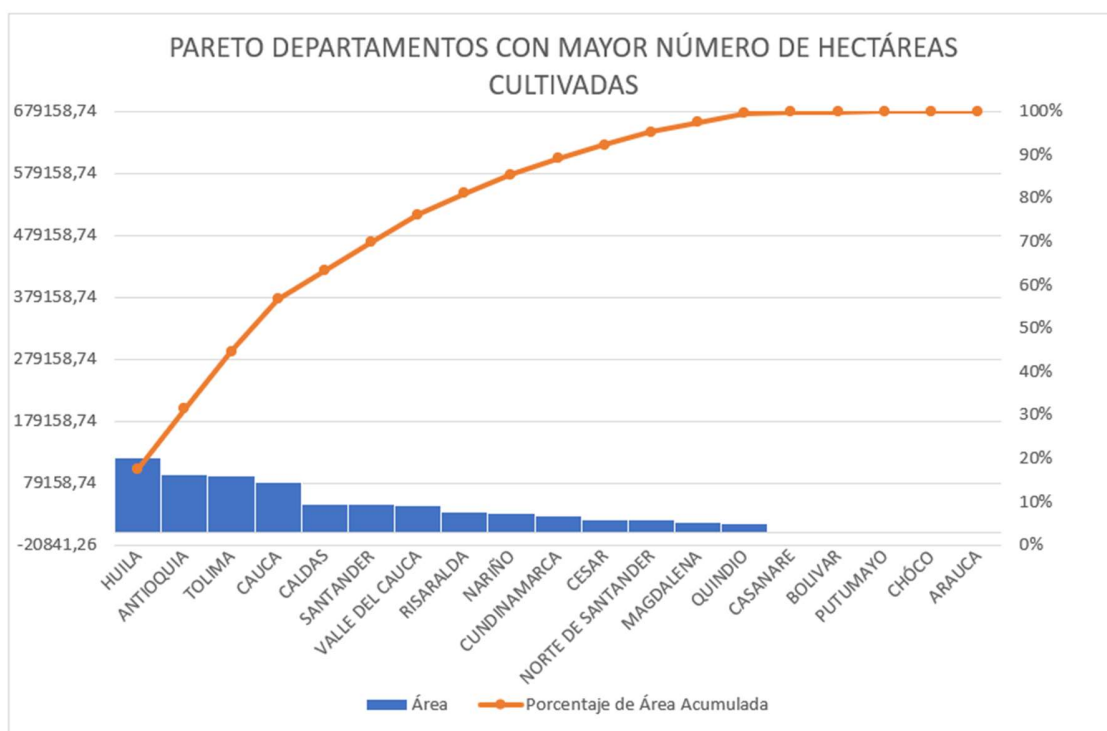


Figura 12. Hectáreas cultivadas por departamento

Fuente: [51]

En Colombia, la diversidad en la estructura productiva de cultivos, la segmentación de las tierras y los temas de orden público han sido características relevantes de las zonas caficultoras y en especial para los habitantes rurales. Adicionalmente, la información

consultada indica que el 70% de los productores de café están ubicados en fincas inferiores a cinco hectáreas y que, son ellos los que presentan los mayores niveles de pobreza extrema de toda la población [52]. Por otra parte, y tomando como referencia la tipología de las fincas del departamento de Caldas, se observa que el 95,3% de los caficultores, están dentro del rango de cafetales menores a cinco hectáreas, como se muestra en la tabla 1 [53].

RANGO DE CAFETAL (hectáreas)	CAFICULTORES (número)	%	ÁREA CAFÉ (hectáreas)	%
Menor a 5	30.633	95,3%	38351	64,7%
Entre 5 y 10	976	3,0%	6563	11,1%
Mayor a 10	535	1,7%	14368	24,2%
Total	32.144	100%	59282	100%

Tabla 2. Estratificación de la caficultura en el departamento de Caldas.

Fuente: [53]

Esta estratificación se presenta en gran parte de los departamentos cafeteros, sin embargo y como se denotó anteriormente, son los pequeños caficultores los que presentan dificultades en la adquisición de energéticos para cubrir necesidades básicas como lo son la cocción de alimentos, toda vez, que el servicio de gas natural domiciliario como fuente de energía es una alternativa con una cobertura territorial a nivel nacional del 67% y se concentra en las zonas de las capitales departamentales. [54] . Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, una de las alternativas que tienen los caficultores es la adquisición de GLP (gas licuado de petróleo), o más conocido como el gas de cilindro o ‘propano’, el cual es utilizado para las actividades domésticas, como la cocción de alimentos.

De acuerdo con la Asociación Gremial Colombiana de Comercializadores de Gas (Agremgas), el mercado de GLP está enfocado a zonas urbanas o rurales con difícil acceso, familias vulnerables o de bajos ingresos, esto corresponde al 70 % del mercado residencial, recalco el gremio. Así las cosas, el gas GLP tiene su mercado concentrado; es decir, más del 50 % de las ventas de GLP se concentran en Antioquia (17 %), Santander (12 %), Valle del Cauca (9 %), Nariño (8 %) y Bogotá D.C. (7 %) [55].

Para seleccionar un caso de estudio representativo, se considera que debido a que predomina la finca menos de 5 hectáreas en casi todo el territorio cafetero, y que a su vez los departamentos que presentan un mayor porcentaje de utilización de GLP están ubicados en las mismas zonas que tienen un porcentaje de producción media de café, se considerará como unidad de análisis una finca tipo de 5 hectáreas. Se analiza el caso específico de una finca de estas dimensiones ubicada en el departamento de Santander.

6.2 Fase 2. Estimación del potencial de biomasa residual de café y su potencial de producción de biogás

En el proceso de producción del café, la proporción de material vegetal que termina como desecho, supera significativamente la cantidad que se emplea directamente en la elaboración de la bebida. La Tabla 2 detalla el peso de los diversos residuos generados en cada paso del método por vía húmeda para un kilogramo de cereza de café [56].

Proceso	Residuo obtenido	Pérdida (en gramos)
Despulpado	Pulpa fresca	436
Desmucilaginado	Mucílago	149
Secado	Agua	171
Trilla	Pergamino	42
	Película plateada	
Torrefacción	Volátiles	22
Preparación bebida	Borra	104
Pérdida acumulada		924

Tabla 3. Residuos obtenidos en el proceso de 1 kg de café cereza en Colombia

Fuente: [56].

Ahora bien, conociendo el porcentaje que representa la pulpa y el mucílago como residuo orgánico por cada kilogramo de café cerezado, es importante conocer un aproximado de la cantidad de residuos de estas características que se pueden generar por hectárea cultivada de café. Para esto se consideró el rendimiento por hectárea (ton/ha), el cual para el año 2022 en la zona de estudio fue de 1,02 ton/ha, teniendo una producción de café de 45048,58 toneladas en un área cosechado de 44378,29 hectáreas. En la tabla 3 se observan el rendimiento de algunas zonas caficultoras de Colombia en el año 2022, como también el nivel de producción y las hectáreas cosechadas [57].

Año	Departamento	Producto	Área (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)
2022	HUILA	CAFE	119.496,76	136.023,18	1,14
2022	ANTIOQUIA	CAFE	93.791,78	94.608,26	1,01
2022	TOLIMA	CAFE	90.110,73	76.413,90	0,85
2022	CAUCA	CAFE	81.288,06	78.052,78	0,96
2022	CALDAS	CAFE	45.159,05	46.223,27	1,02
2022	SANTANDER	CAFE	44.378,29	45.048,58	1,02
2022	VALLE DEL CAUCA	CAFE	42.929,23	37.093,76	0,86
2022	RISARALDA	CAFE	33.376,97	33.387,59	1,00
2022	NARIÑO	CAFE	29.495,25	26.660,59	0,90
2022	CUNDINAMARCA	CAFE	25.583,51	21.163,61	0,83
2022	CESAR	CAFE	20.604,06	15.830,57	0,77
2022	NORTE DE SANTANDER	CAFE	20.260,38	18.161,91	0,90
2022	MAGDALENA	CAFE	15.564,90	9.489,16	0,61
2022	QUINDIO	CAFE	14.259,28	13.441,83	0,94

Tabla 4. Rendimiento ha/ton de café arábico en Colombia año 2022

Fuente: [57].

Teniendo en cuenta que, en Santander, por ser una zona bastante seca, se recomienda hacer la siembra a finales de abril para que la única cosecha del año se pueda recoger entre octubre y noviembre [58], de este modo se estimó la cantidad de residuos generados en la finca cafetera según la información de rendimiento de cultivo cosechado por hectárea, y el porcentaje de residuos obtenidos por cada kilogramo de café cosechado. Dando como resultado que por hectárea cosechada se generan 448,8 kg de pulpa y 153 kg de mucílago. Información mostrada en la tabla 4.

1ha	→	1020 Kg café
1020 Kg café	→	100%
448,8 Kg pulpa	→	44%
153 Kg mucilago	→	15%

Tabla 5. Rendimiento de cultivo cosechado por hectárea

Tras obtener los resultados de porcentaje de residuos por hectárea de café cosechado, se realizaron los cálculos necesarios para determinar el potencial estimado de producción de CH_4 y de CO_2 del mucilago y pulpa de café, esto considerando que son los residuos orgánicos más representativos. Esto permite estimar el volumen de biogás producido, lo cual es necesario para calcular el volumen total del biodigestor. Para realizar estos cálculos, se utilizó un modelo teórico basado en un análisis estequiométrico para de esta manera encontrar una relación basada en el porcentaje de masa de los componentes de la biomasa [59].

Adicionalmente, para determinar la caracterización fisicoquímica del mucilago y la pulpa, se han tenido en cuenta algunas investigaciones realizadas por diversos autores en diferentes sectores cafeteros en Colombia; debido a lo anterior los valores presentados en la tabla 4 y 5, son una aproximación de los resultados obtenidos en estudios realizados en los departamentos de Risaralda, Caldas y Quindío [60]. El análisis elemental muestra que tanto la pulpa como mucílago de café está compuesto principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno, que son los elementos que componen los carbohidratos, los lípidos y las proteínas [61]; el análisis próximo muestra que la pulpa y el mucílago de café tienen un alto contenido de humedad, en base a las mediciones de ceniza y el valor de sólidos volátiles (VS) [62]. Los valores de referencia para el mucilago se presentan en la tabla 5, del mismo modo en la tabla 6, se presentan los valores de la pulpa.

Análisis	Parámetro	Resultado	Unidades
Análisis Elemental	Poder Calorífico	2000	kJ/kg
	Carbono (C)	46,82	% BS
	Hidrogeno (H)	6,72	% BS
	Oxígeno (O)	44,35	% BS
	Nitrógeno (N)	1,53	% BS
	Azufre (S)	0,58	% BS
Próximo	Humedad Total	85,1	%
	Ceniza	6,19	% BS
	Sólidos Volátiles	0,092	% BS
	Sólidos Totales	78,94	%

Tabla 6. Valores análisis elemental – análisis próximo de mucilago de café

Fuente: [61]

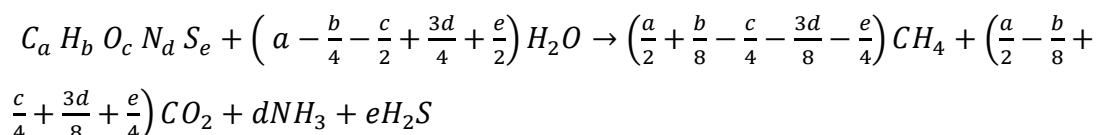
Análisis	Parámetro	Resultado	Unidades
Análisis Elemental	Poder Calorífico	2000	kJ/kg
	Carbono (C)	50,1	% BS
	Hidrogeno (H)	7,29	% BS
	Oxígeno (O)	40,02	% BS
	Nitrógeno (N)	2,38	% BS
	Azufre (S)	0,21	% BS
Próximo	Humedad Total	85,16	%
	Ceniza	8,24	% BS
	Sólidos Volátiles	76,26	% BS
	Sólidos Totales	78,94	%

Tabla 7. Valores análisis elemental – análisis próximo de pulpa de café

Fuente: [62]

Como la estimación de la generación de biogás a partir de la pulpa y el mucilago presenta diferentes incertidumbres, la mayoría de los modelos estequiométricos utilizan reacciones de degradación completa, ya que son más sencillos de ajustar y no introducen más incertidumbre de la ya existente; para esto y a partir de la estimación del análisis

elemental, se aplica la siguiente relación estequiométrica [59], para determinar el volumen de biogás generado por digestión anaerobia para los dos residuos.



Según los cálculos de porcentaje de residuos por hectárea de café cosechado, se tiene que el mucilago fresco tiene un peso de 153 kg y la pulpa 448,8 kg, sin embargo, estos residuos contienen un porcentaje de humedad aproximado para ambos casos de 85,1% , lo que da que la materia seca sea de 22,797 kg y 66,6 Kg respectivamente; adicionalmente y con los datos del análisis elemental se calcula la composición mol del elemento, para posteriormente realizar la relación molar normalizada a 1 mol de nitrógeno, lo que corresponde a $123,08 \frac{g}{mol}$ para el mucilago y $82,82 \frac{g}{mol}$ para la pulpa de materia orgánica biodegradable rápidamente (MOBR). Con este dato y mediante los cálculos expresados en la parte inferior, determinaron los valores en relación con el CH_4 y CO_2 .

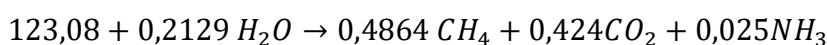
$$C_1 = \left(a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2} + \frac{3d}{4} + \frac{e}{2} \right) = 0,2129$$

$$C_2 = \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4} \right) = 0,4864$$

$$C_3 = \left(\frac{a}{2} - \frac{b}{8} + \frac{c}{4} + \frac{3d}{8} + \frac{e}{4} \right) = 0,4224$$

$$C_4 = d = 0,025$$

$$C_5 = e = 0,004$$



$$123,08 + 0,2129 (18) \rightarrow 0,4864 (16) + 0,424(44) + 0,025(17)$$

$$123,08 + 3,833 \rightarrow 7,803 + 18,592 + 0,423$$

Ahora bien, para determinar el volumen de dióxido de carbono y metano (CH_4) que se va a producir, se tuvo en cuenta la densidad en condiciones normales ($25^\circ\text{C} - 101.325$ kPa) del metano (CH_4) $0,668 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ y del dióxido de carbono (CO_2) $1,842 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Por lo tanto y utilizando las fórmulas matemáticas expresadas a continuación, se determinaron los volúmenes de metano (CH_4) $2,17 \text{ m}^3$ y dióxido de carbono (CO_2) $1,86 \text{ m}^3$ para la biomasa residual de mucilago y de volúmenes de metano (CH_4) $31,23 \text{ m}^3$ y dióxido de carbono (CO_2) $22,29 \text{ m}^3$ para la pulpa.

$$\text{Volumen de } CH_4 = \frac{CH_4 * \text{peso de la muestra}}{MOBR * \text{densidad } CH_4}$$

$$\text{Volumen de } CO_2 = \frac{CO_2 * \text{peso de la muestra}}{MOBR * \text{densidad } CO_2}$$

Con los volúmenes de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) para las dos biombras residuales, se puede determinar el volumen teórico de biogás generado por kg de mucilago en condiciones anaeróbica, dando como resultado que 1kg de mucilago se puede generar $0,177 \text{ m}^3$ de biogás y del mismo modo 1kg de pulpa se pueden generar $0,80 \text{ m}^3$ de biogás en condiciones normales; es de anotar que los valores descritos en estos documentos hacen referencia a valores teóricos y aproximados, por lo cual pueden presentar variaciones dependiendo el origen del café (zona de estudio), condiciones del cultivo, procesamiento y métodos de análisis utilizados. Para obtener una información precisa y específica sobre una muestra en particular, se deben realizar pruebas de laboratorio directas.

Por otra parte, y realizando una comparación con diferentes investigaciones elaboradas por la Cenicafe la cual se muestra en la tabla 7, se establece que la producción de biogás

por kilogramo de mucilago es de $0,287 \frac{m^3}{kg}$ [63]. Adicionalmente se estima que la producción de biogás por kilogramo de pulpa es de $0,487 \frac{m^3}{kg}$ [64]. Tanto en Colombia como en otros países de la región, se han realizado varios estudios sobre la producción de biogás a partir de pulpa de café; en uno de estos estudios, se encontró que la pulpa de café fresca produce un promedio de 250 litros de biogás por kilogramo [65]. En otro estudio, se encontró que la pulpa de café deshidratada produce un promedio de 300 litros de biogás por kilogramo [66].

Zona de estudio	Volumen de Biogás m ³	Temperatura ambiente °C
Santander - Colombia	0,8	24
Pereira - Colombia	0,487	29
Mendoza - Perú	0,25	31
Medellín - Colombia	0,3	27

Tabla 8. Comparación de estudios de generación de biogás a partir de pulpa de café

Fuente: [64], [65], [66]

6.3 Fase 3. Diseño conceptual de un biodigestor tipo para la producción de biogás para pequeñas fincas caficultoras

Para cálculos de diseño del biodigestor tubular anaerobio, se utilizaron valores de referencia, teniendo en cuenta que en promedio un pequeño caficultor procesa de 50 kg a 70 kg de café cereza al día, lo que implica un promedio de 7,5 kg de producción de mucilago fresco (PDM) y de 22 kg de pulpa fresca (PDP), el cual tendrá una relación de mezcla de agua (m.a) 1:3 (1kg de mucilago + 1kg de pulpa – 3 litros de agua) [67]; ahora bien, teniendo en cuenta que en los procesos de despulpado y desmucilaginado se realizan mediante el método por vía húmeda, lo que conlleva a utilizar de 1 a 4 litros de agua para realizar el proceso. Lo anterior evitaría el uso de agua adicional para realizar la mezcla que se ingresara al biodigestor

Por otra parte, el tiempo de retención presenta una correlación con la temperatura ambiente, teniendo que, para Santander, la temperatura promedio según datos oficiales del IDEAM es de 22,6 °C, se considera una digestión mesofílica (20 – 40°C) y el tiempo de retención (TR) para los procesos de digestión mesofílica varían entre 25 a 30 días [68]. Por lo cual para este análisis se consideró un tiempo de retención de 30 días. Con los datos anteriormente descritos, se procedió a calcular el volumen del biodigestor utilizando la ecuación 1, lo que conduce a que el volumen requerido para el biodigestor es de 3,54 m³.

Ecuación 1

$$V = \frac{(PDM + PDP + m. a) * TR}{1000}$$

Calculado el volumen del biodigestor, se calculó también el área de la fosa para la ubicación del biodigestor, el cual por deberá ubicarse en un punto medio entre el área de procesamiento de café y la zona de cocción (cocina); la fosa es una excavación para que sirva de contenedor y al mismo tiempo soporte el peso de la mezcla (biomasa residual más agua), adicional a lo anterior, la fosa funcionara como un aislante natural. Las medidas de la excavación se calcularon en forma trapezoidal, lo anterior con el fin de evitar derrumbes que afecten el biodigestor. Para los cálculos relacionados a la fosa se utilizó la ecuación 2, dando como resultado que la fosa tendrá el mismo volumen que el biodigestor 3,54 m³. En las figuras 12 y 13 se presenta un esquema básico de la fosa y biodigestor.

Ecuación 2

$$longitud = \frac{V}{\left(\frac{b_1 + b_2}{2}\right) * h}$$

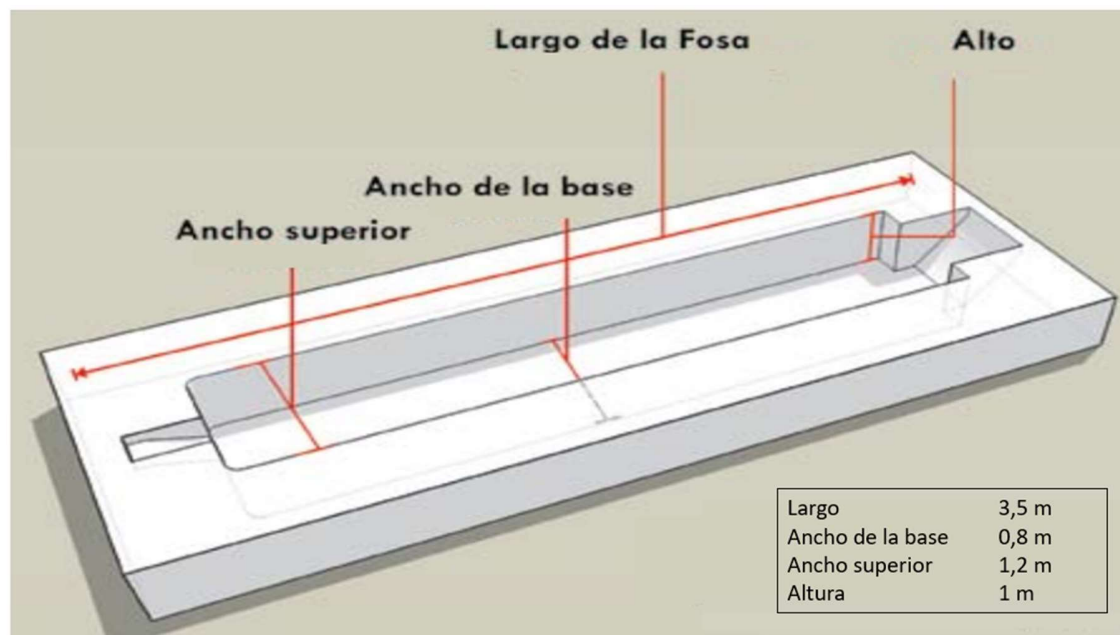


Figura 13. Fosa para biodigestor tubular

Fuente: [69]

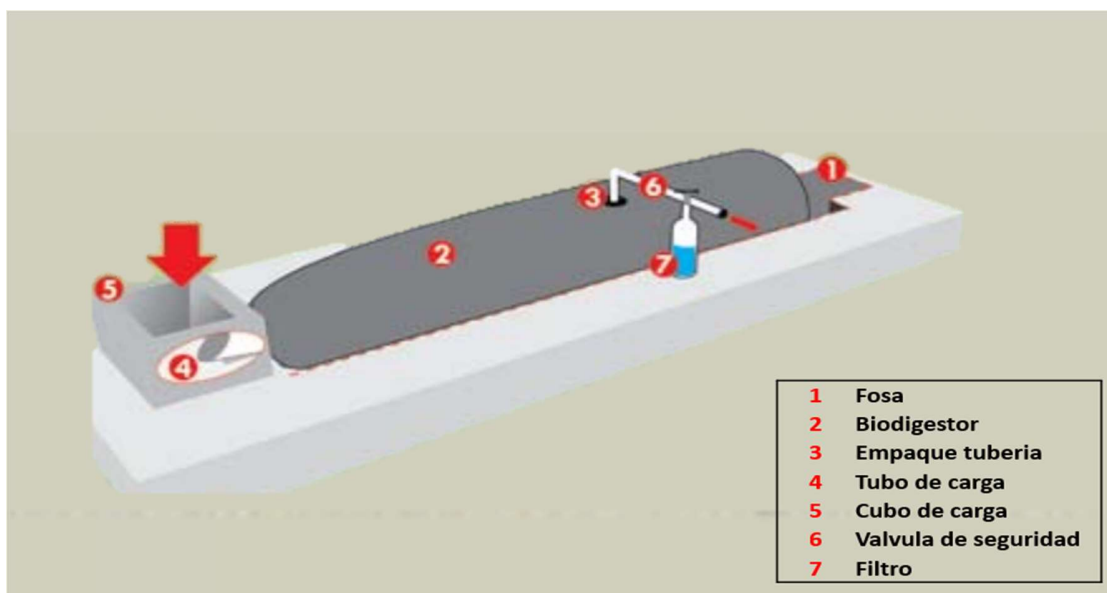


Figura 14. Biodigestor tipo tubular

Fuente: [69]

6.4 Fase 4. Delimitación de la zona de análisis, se obtuvieron los siguientes resultados:

La demanda residencial de GLP en Colombia aumentó durante los años 2020 y 2021, impulsada por los cambios de consumo durante la pandemia y las perspectivas de sustitución de leña y carbón por GLP. En 2021, las ventas de GLP promediaron 59.173 toneladas mensuales, un 3,94 % más que en 2020. Los departamentos con mayor consumo en el año 2021 fueron Antioquia (17 %), Santander (11 %), Valle del Cauca (8 %), Nariño (8 %), Cundinamarca (8 %) y Bogotá D.C. (8 %) [70]; con lo anterior se puede denotar que el consumo de GLP está enfocado a zonas urbanas o rurales con difícil acceso, familias vulnerables o de bajos ingresos, lo cual corresponde al 70 % del mercado residencial [71].

El precio de un cilindro de gas propano en Colombia puede variar significativamente según la región y la empresa proveedora. Colgas, una compañía con sede en el departamento de Caldas publicó su tarifa oficial, que establece un rango de precios entre 24.000 y 200.000 pesos colombianos, dependiendo del tamaño del cilindro [72]. Según indica la misma empresa, el precio estimado de un cilindro de gas propano de 40 libras es de \$85.000 COP. Este cilindro tiene un rendimiento promedio de 20 días y suele ser utilizado por una familia promedio en zonas rurales, donde la composición habitual es de cuatro habitantes. Cabe destacar que el cilindro de 40 libras es ampliamente preferido y comercializado en dichas áreas.

Ahora bien, entendiendo que la zona de estudio es uno los departamentos que más consume los cilindros de gas propano en el país, los cuales, son utilizado en mayor medida para la cocción de alimentos; teniendo en cuenta lo anterior, en promedio el costo de adquisición mensual por este energético es cercano a los \$173.000 COP. Por otra parte, al comparar el análisis y los cálculos realizados para el aprovechamiento de la biomasa residual del café (pulpa – mucilago) se obtuvo que bajo el proceso de digestión anaeróbica del residuo de una hectárea de café cereza, se puede producir 387,23 m^3 .

Teniendo en cuenta lo anterior, se presenta la limitante de almacenamiento del biogás dentro del biodigestor, puesto que el gasómetro permite el almacenamiento a una presión de 2 a 5 atm [73]. Dicho lo anterior el biogás generado pueden ser aprovechados durante 120 días, teniendo como base 4 horas de operación al día y contemplando que para cocinas de biogás de dos hornillas tiene el rendimiento es de 0,20 a $0,45 \frac{m^3}{h}$ [74]. Sin embargo, es importante tener en cuenta que un biodigestor anaeróbico comienza a obtener biogás de manera significativa entre 15 a 40 días, estos tiempos pueden variar dependiendo de factores como la composición del sustrato, la temperatura de fermentación y la presencia de otros nutrientes [75].

Con los datos calculados de generación de biogás, rendimiento de biogás para cocina, y volumen del digestor, se realizó la búsqueda de biodigestores tubulares comerciales, para lo cual se encontró que para la implementación de una planta de biogás con una capacidad líquida de $3,5 m^3$, que consta de un biodigestor tubular elaborado en geomembrana lo que representa una mayor vida útil y una presión de operación de mayor, e implementando todos sus diferentes equipos de medición y seguridad (manómetro, válvula de alivio, válvula de pulga, líneas de conducción de biogás), tiene un valor promedio de \$4.000.000 COP, lo cual representa el capex del proyecto (incluye el balance de planta - líneas de gas, tanque de almacenamiento para el digestato, soporte estructural en concreto, válvula de alivio).

Como método de filtración y con el fin de no generar costos adicionales en el capex, se tiene la absorción con compuesto de hierro, para lo cual se utiliza viruta de hierro colocada en columnas de purificación, las cuales se encuentran rellenas con otros materiales como el aserrín y agua; lo anterior lograra eliminar eficientemente el H_2S [76], sin tener que realizar inversiones en compuestos sintéticos adicionales.

Relacionando el costo del consumo de gas propano de una pequeña finca caficultora al mes, se tiene que en promedio se gastan \$173.000 COP, lo que proyectado a los 120 días (4 meses) sería de gasto \$ 690.000 COP (tabla 7); por otra parte, con la posibilidad de

implementación de una planta de biogás y con relación al valor que tiene este tipo de plantas en el mercado (\$4.000.000 COP), se tendría que en un periodo de 5 años se realizaría el retorno de la inversión, como se muestra en la figura 14. Adicionalmente para este análisis, no se contempló la variación que se presente en la venta del gas propano en el transcurrir de este tiempo; lo que representaría una variación en el periodo calculado. Del mismo modo no se contemplan los procesos de mantenimiento preventivo ni correctivo (*OPEX*), puesto que la mayoría de los mantenimientos para este tipo de sistemas en los primeros años son de revisión visual para la detección de fugas.

Debido a las condiciones económicas propias de las familias caficultoras de las zonas rurales del departamento de Santander, y tenido en cuenta que la inversión inicial (*CAPEX*) oscila alrededor de los \$4.000.000 COP, y el retorno de la inversión para este tipo de proyectos es en promedio de 5 años; es recomendable realizar una consulta con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, teniendo como finalidad aplicar a los diferentes beneficios tributarios de la ley 1715 de 2014, como los son la exclusión de bienes y servicios de IVA, depreciación acelerada, deducción especial para determinar el impuesto sobre la renta [77]. Lo anterior reduciría el retorno de la inversión y viabilizaría económicamente este tipo de proyectos.

AHORRO EN FACTURA CONVENCIONAL DE GLP POR BIOGAS DE PULPA Y MUCILAGO DE CAFÉ					BIODIGESTION TUBULAR		
CILINDRO DE GLP 40 L	TARIFA PAGADA DE GLP COP Gas/Mes	TARIFA PAGADA DE GLP COP Gas/Año	Transporte COP Gas/Año	AHORRO PRIMER AÑO		AHORRO	
\$ 84.000	\$ 168.000	\$ 672.000	\$ 20.000	\$ 692.000	AÑO 1	\$ 692.000	-\$ 4.000.000
				\$ 733.520	AÑO 2	\$ 733.520	-\$ 3.308.000
				\$ 777.531	AÑO 3	\$ 777.531	-\$ 2.574.480
				\$ 824.183	AÑO 4	\$ 824.183	-\$ 1.796.949
				\$ 873.634	AÑO 5	\$ 873.634	-\$ 972.766
				\$ 926.052	AÑO 6	\$ 873.634	-\$ 99.132
				\$ 981.615	AÑO 7	\$ 926.052	\$ 826.920
				\$ 1.040.512	AÑO 8	\$ 981.615	\$ 1.808.536
				\$ 1.102.943	AÑO 9	\$ 1.040.512	\$ 2.849.048
				\$ 1.169.119	AÑO 10	\$ 1.102.943	\$ 3.951.991
				\$ 1.239.267	AÑO 11	\$ 1.169.119	\$ 5.121.110
				\$ 1.313.623	AÑO 12	\$ 1.239.267	\$ 6.360.377
				\$ 1.392.440	AÑO 13	\$ 1.313.623	\$ 7.673.999
				\$ 1.475.986	AÑO 14	\$ 1.392.440	\$ 9.066.439
				\$ 1.564.546	AÑO 15	\$ 1.475.986	\$ 10.542.426
						\$ 1.564.546	\$ 12.106.971

Tabla 9. Ahorro en factura convencional de GLP por Biogás

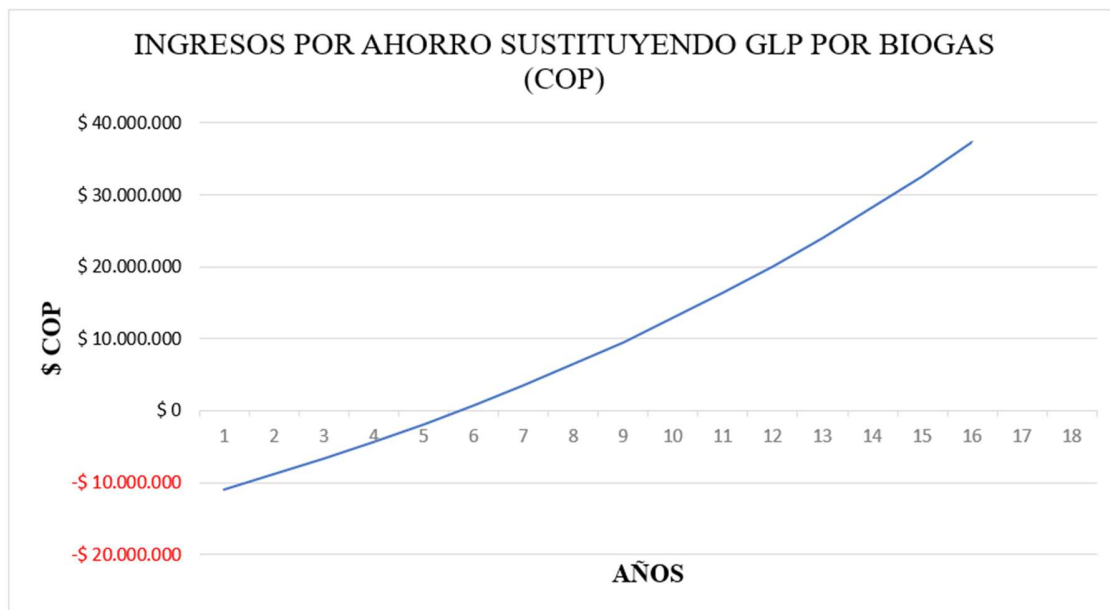


Figura 15. Curva de retorno de inversión de proyecto de biodigestor tubular

Capítulo 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Partiendo del análisis de los datos de producción de las pequeñas fincas caficultoras de Colombia, así como también de la identificación de la biomasa residual del café, se planteó una propuesta para el aprovechamiento energéticos de esta biomasa con el fin de cubrir una necesidad básica como es la cocción de alimentos en la zona cafetera del departamento de Santander

Con base en el análisis de las zonas cafeteras en Colombia, y en relación con el rendimiento de hectárea por tonelada de café cultivado, y teniendo en cuenta el uso de gas propano en las mismas zonas, se realizó un análisis comparativo, encontrando que el departamento de Santander se encuentra en el intervalo de mayor consumo de gas propano, teniendo un consumo 12% del mercado de gas propano residencial a nivel nacional, del mismo modo hace parte de uno de los departamentos con mayor producción de café por hectárea, con un rendimiento de 1.02 ton/ha, encontrando así el departamento de Santander sería un punto de partida para el desarrollo de la investigación.

Los residuos originados en el proceso por vía húmeda en la industria cafetera poseen una composición fisicoquímica que los hace idóneos como materias primas para la implementación de procesos bioquímicos para la producción de energéticos como lo es el biogás. En particular, la pulpa y el mucílago ofrece fuentes de carbono que pueden ser explotadas por microorganismos en procesos de digestión anaerobia; encontrando que con la pulpa se pueden generar $0.803 \frac{m^3}{kg}$ de biogás, y con el mucilago se alcanza una producción de $0.177 \frac{m^3}{kg}$; es de resaltar que los valores anteriormente relacionados hacen referencia a valores teóricos y aproximados, por lo cual pueden presentar variaciones dependiendo el origen del café (zona de estudio).

Con relación a la generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia de los residuos de pulpa y mucilago, y revisando que por hectárea cosechada de café se generan aproximadamente 600 kg de residuos, se calculó que se podrían generar $387 m^3$ de biogás, lo que, en relación con el consumo para la cocción de alimentos de una estufa de dos hornillas ($0,2$ a $0,45 \frac{m^3}{h}$), se tendría que el biogás generado alcanzaría para un promedio de 200 a 300 días, sin embargo este biogás no se puede almacenar por largos periodos de tiempo, lo que limita su uso para la cocción de alimentos a solo 4 meses, lo que presenta una dificultad para suplir la demanda de gas propano de las pequeñas fincas caficultoras.

De aprovecharse una mayor cantidad de residuos del proceso del café o realizar una codigestion con diferentes residuos orgánicos como por ejemplo estiércol de animal, se deberá contemplar el almacenamiento del biogás generado, del mismo modo se recomienda generar un nuevo análisis de generación para modificar el dimensionamiento del biodigestor, lo que tendría como repercusión el incremento de la implementación de este sistema, y un periodo de retorno mayor.

El análisis de costo beneficio bajo la adquisición o proyección económica de una planta para la generación de biogás (biodigestor tubular de geomembrana), se realizó teniendo en cuenta un mínimo de café cosechado equivalente a una hectárea, con lo cual se requiere un biodigestor para el aprovechamiento de biomasa residual con una capacidad de $3,5 m^3$. Partiendo de la capacidad de carga y generación de biogás se cotizó un biodigestor de geomembrana que en promedio por metro cubico de capacidad tendrá un costo de un millón de pesos. Realizando una comparación entre el costo comercial del cilindro de gas propano de 40 libras, y el costo del biodigestor para cubrir la demanda energética de cuatro meses, se proyectó que el retorno de la inversión bajo una implementación del biodigestor se dará a finales del quinto año lo que se podría considerar no rentable para las pequeñas fincas cafeteras.

La introducción de un biodigestor de bajo costo, específicamente del tipo tubular, representa un sistema simple y práctico que impacta en diversos aspectos ambientales,

económicos y productivos para los pequeños caficultores en diversos departamentos del país. Este enfoque se configura como una solución parcial para abordar los desafíos en su entorno, contribuyendo de manera positiva a la mejora de sus prácticas agrícolas y de uso de energéticos renovables, sin embargo, la baja capacidad de almacenamiento de estos sistemas es una limitante para la implementación.

El aprovechamiento energético de la biomasa residual, en particular, de los residuos generados durante el procesamiento del café, ha evidenciado ser una alternativa viable para la generación de biogás. Esta opción se destaca por requerir una inversión en infraestructura por metro cuadrado relativamente baja, lo que la hace más accesible y atractiva, especialmente para fincas cafeteras que presenten una mayor producción (medianos caficultores). Además, la simplicidad en la construcción y mantenimiento de estos sistemas de biogás los convierte en una elección práctica y eficiente para acercar la transición energética a diferentes sectores.

Para la promoción y financiamiento de proyectos de generación de biogás a partir de residuos agroindustriales en Colombia, se recomienda la creación de entidades vinculadas al ministerio de agricultura y al ministerio de mina; dado el considerable potencial de este enfoque en el país, se vislumbra una transición progresiva del biogás hacia una posición destacada en la matriz energética nacional.

Esta iniciativa proyecta impactos relevantes, anticipándose a una reducción en el consumo gas licuado de petróleo en las regiones ricas en biomasa residual. La migración hacia el biogás como recurso energético no solo implica beneficios ambientales, sino que también representa un avance estratégico hacia fuentes más sostenibles y eficientes en el panorama energético nacional.

Referencias

- [1] R. A. Parra Huertas, «Anaerobic digestión: biotechnological mechanisms in waste water treatments and their application in food industry,» Tunja, 2015.
- [2] E. López Dávila y J. Jiménez Hernández, «APPLICATION OF THE ANAEROBIC DIGESTION TECHNOLOGY TO TREAT SOLID AGROINDUSTRIAL WASTE USING PORCINE STRETCH INOCULO, IN MESOFÍLIC CONDITIONS,» Santiago de Cuba, 2012.
- [3] M. A. Sánchez Góngora, I. E. Peón Escalante y T. Cardona Juárez, «Anaerobic co-digestion of the organic fraction of urban solid waste and its leachate,» México, Distrito Federal, 2016.
- [4] «United States Environmental Protection Agency,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.epa.gov/agstar/how-does-anaerobic-digestion-work#:~:text=Anaerobic%20digestion%20is%20a%20process,in%20the%20absence%20of%20oxygen..>
- [5] M. d. A. y. D. Sostenible, «Gobierno de Argentina,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/accion/biodigestores#:~:text=Un%20biodigestor%20permite%3A,un%20sitio%20de%20disposici%C3%B3n%20final..>
- [6] Naturgas, «Asociacion Colombiana de Gas Natural,» [En línea]. Available: <https://naturgas.com.co/congreso-naturgas/>. [Último acceso: 03 2023].
- [7] Unidad de planeación minero energética, «Primer balance de Energía Útil para Colombia y Cuantificación de las Perdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética,» Bogotá y Karlsruhe, 2019.
- [8] C. D. L. REPUBLICA, «Ley 1715,» 2014.
- [9] ICO, «International Coffee Organization,» [En línea]. Available: https://www.ico.org/new_historical.asp. [Último acceso: 02 2023].
- [10] F. N. d. Cafeteros, «Federación Nacional de Cafeteros,» [En línea]. Available: <https://federaciondefcafeteros.org/wp/blog/las-areas-a-renovar-en-colombia-en-los-proximos-anos/#:~:text=Hoy%20Colombia%20posee%20974.000%20hect%C3%A1reas,variedades%20resistentes%20a%20la%20roya>. [Último acceso: 17 03 2023].
- [11] H. Criollo Escobar y D. Benavides Arteaga, «Socioeconomic characterization of coffee farms of the department of Nariño, Colombia,» Nariño, 2019.
- [12] F. N. d. Cafeteros, «Federación Nacional de Cafeteros 2023,» [En línea]. Available: <https://federaciondefcafeteros.org/wp/productos/cafe-verde/>. [Último acceso: 02 2023].
- [13] R. A. Parra Huertas, «Anaerobic digestión: biotechnological mechanisms in waste water treatments and their application in food industry,» Tunja - Colombia, 2015.

- [14] Y. Fernández Cortés, K. D. Sotto Rodríguez y L. A. Vargas Marín, «Environmental impacts from coffee production and to the sustainable use of the waste generated,» Caldas, 2020.
- [15] D. G. Puebla, «Estudio de la Digestion Anaerobia en dos fases para el tratamiento de las aguas residuales de despulpe del beneficiado húmedo del cafe,» Madrid, 2012.
- [16] D. A. N. d. Estadística, «Censo Nacional de Poblacion y Vivienda,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/cnpv-2018-presentacion-3ra-entrega.pdf>. [Último acceso: 17 03 2023].
- [17] -. U. N. d. C. -. UPME, «Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento,» 2018.
- [18] UPME, «Atlas de Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia,» 2010.
- [19] M. d. Agricultura, «Agronet,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/El-agro-fue-el-%C3%BAnico-sector-que-cerri%C3%B3-el-cuarto-trimestre-de-2022-en-decrecimiento.aspx#:~:text=Pero%20en%202022%20fue%20el,baja%20de%200%2C6%25..>
- [20] M. d. Agricultura, «Agronet,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=2>.
- [21] U. d. P. R. Agropecuaria, «UPRA,» 2023. [En línea]. Available: https://upra.gov.co/es-co/Paginas/eva_2022.aspx.
- [22] P. Ú. d. E. Colombiano, «GOV.CO,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.datos.gov.co/Agricultura-y-Desarrollo-Rural/AREA-COSECHADA-POR-CULTIVO-Vs-RENDIMIENTO/qe4x-bk9t>.
- [23] F. N. d. C. d. Colombia, «INFORME DE GESTION,» 2022. [En línea]. Available: <https://federaciondecafeteros.org/wp/tipos/informes/>.
- [24] D. A. N. D. E. (DANE), «Boletín Estadístico Sector Agropecuario,» 2022.
- [25] N. España, «Bonka,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.bonka.es/amor-por-el-cafe>. [Último acceso: 10 2023].
- [26] G. I. Puerta Quintero , «Beneficie correctamente su café y conserve la calidad de la bebida,» Chinchina - Caldas, 2020.
- [27] «OCU,» [En línea]. Available: <https://www.ocu.org/alimentacion/cafe/informe/procesado-del-cafe>. [Último acceso: 15 10 2023].
- [28] A. E. Peñuela Martínez y C. E. Oliveros Tascón, REMOCIÓN DEL MUCÍLAGO DE CAFÉ A TRAVES DE FERMENTACION NATURAL, Caldas, 2010.
- [29] H. Calle Velez, «Cenicafé - Subproductos del café. Chinchiná,» 1977.
- [30] J. Zuluaga Vasco, «CENICAFÉ - Manejo del agua en proceso de beneficio humedo del café para el control de la contaminacion,» 1993.

- [31] N. D. Montiel Bohórquez y J. F. Pérez, «Energy Generation from Municipal Solid Waste. Thermodynamic Strategies to Optimize the Performance of Thermal Power Plants,» Medellín, 2019.
- [32] A. Gallardo Izquierdo y F. J. Colomer Mendoza, APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS SÓLIDOS, Costa Rica, 2019.
- [33] B. A. Parra Orobio , P. Torres Lozada y . L. F. Marmolejo Rebellón, «INFLUENCE OF pH ON ANAEROBIC DIGESTION OF MUNICIPAL BIO-WASTES,» Cali, 2014.
- [34] I. (. p. l. D. y. A. d. l. Energía), «Biomasa: Digestores anaerobios,» Madrid, España, 2007.
- [35] M. . A. Sarabia Méndez y J. . R. Laines Canepa, «PRODUCTION OF BIOGAS BY ANAEROBIC CODIGESTION OF SHEEP FECES AND RUMEN ADDED WITH WASTEWATER PLANT SLUDGE,» Ciudad de Mexico, 2017.
- [36] J. Rodrigo, . N. Cañellas y M. Meneses Benítez, El Consumo de energía y el medio ambiente en la vivienda en España : Análisis de ciclo de vida, Barcelona: Fundación Gas Natural, 2008.
- [37] M. D. P. Celis Celis, «BIODIGESTORES COMO ALTERNATIVA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS GENERADOS EN ZONAS RURALES,» Bogotá, 2020.
- [38] M. d. Ambiente, «Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia,» Fondo Nacional de Porcicultura , Bogotá, 2020.
- [39] M. A. y. C. C. Dirección de Sustentabilidad, «Manual de biogás - Conceptos básicos, beneficios de su producción y la aplicación de sus sub-productos,» Buenos Aires - Argentina.
- [40] M. T. Varnero Moreno, «MANUAL DE BIOGÁS,» Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Chile, 2011.
- [41] M. Herrero, «Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación,» Redbiolac, Ecuador, 2019.
- [42] A. Rasi Aoki, «Effect of Agitation on Anaerobic Co-Digestion of Swine Manure and Food Waste,» Brasil, 2021.
- [43] K. Nielsen, C. Luise Roß y M. Hoffmann, The Chemical Composition of Biogas Digestates Determines Their Effect on Soil Microbial Activity, Berlin , 2020.
- [44] J. M. i. Roset, «Situación y potencial de generación de biogás. Estudio Técnico PER 2011-2020,» Madrid, 2011.
- [45] C. Wojciech, N. Mateusz y P. Grzegorz, «Sustainable management and recycling of anaerobic digestate solid fraction by composting: A review,» *ELSEVIER*, vol. 375, 2023.
- [46] L. Morey, B. Fernández y L. Tey, «Acidification and solar drying of manure-based digestate to produce improved fertilizing products,» *Journal of Environmental Management*, vol. 336, 2023.

- [47] A. Hamui Sutton, «An approach to mixed methods research in medical education,» *Investigación en Educación Médica*, vol. 2, nº 8, 2013.
- [48] A. N. d. E. d. C. d. Colombia, «Asoexport,» [En línea]. Available: <https://asoexport.org/>. [Último acceso: 07 2023].
- [49] F. C. d. Cafeteros, «Cafe de Colombia,» [En línea]. Available: <https://www.cafedecolombia.com/particulares/>. [Último acceso: 07 2023].
- [50] federacion Nacional de Cafeteros de Colombia , «Federacion de Cafeteros - ÉPOCAS DE LA COSECHA CAFETERA EN COLOMBIA,» [En línea]. Available: <https://federaciondecafeteros.org/wp/cosecha-cafetera/>. [Último acceso: 09 2023].
- [51] M. d. Agricultura, «Censo Nacional Agropecuario,» 2014.
- [52] J. Garcia y L. Vacca, «Evolución de la distribución de las fincas cafeteras,» *Federación Nacional de Cafeteros de Colombia* .
- [53] C. d. c. d. Caldas, «INFORME DE GESTIÓN 2021,» p. 4, 2021.
- [54] P. S. ESP, «Promigas,» 08 2023. [En línea]. Available: <https://www.promigas.com/informeSector2020/Paginas/Transporte-gasCol.aspx>.
- [55] Asociación Gremial Colombiana de Comercializadores de Gas, «Agremgas,» 17 08 2023. [En línea]. Available: <https://agremgas.com/>.
- [56] N. Rodríguez Valencia; y D. A. Zambrano Franco, «Manejo y disposicion de los subproductos de las aguas residuales del beneficio del café,» de *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura*, Bogota.
- [57] U. d. P. R. Agropecuaria, «Agronet,» [En línea]. Available: <https://www.agronet.gov.co/Paginas/ProduccionNacionalDpto.aspx>. [Último acceso: 10 2023].
- [58] A. Jaramillo Robledo , «Épocas Recomendadas para la siembre del café en Colombia,» 2016.
- [59] G. Tchobanoglous, *Gestion Integral de Residuos Solidos*, McGraw-Hill, 1994.
- [60] K. T. Montenegro Orozco1 y A. S. Rojas Carpio, «Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca,» Bogota, 2016.
- [61] F. Marín Mejía y C. Villa Ramírez, «ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS GENERADO A PARTIR DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE RESIDUOS DE CAFÉ EN UNA MICROTURBINA A GAS,» Universidad Tecnológica de Pereira, Pareira, 2020.
- [62] H. J. Zambrano DA, « Demanda Quimica De Oxígeno Y Nitrógeno Total, De Los Subproductos Del Proceso Tradicional De Beneficio Húmedo Del Café,» Cenicafe, Caldas, 1998.
- [63] Z. F., *Estudios de planta piloto para el tratamiento anaeróbico de las aguas residuales del proceso de beneficio húmedo del café.*, Caldas, 1994.

- [64] F. Marín Mejía, Análisis del potencial energético del aprovechamiento de biogás generado a partir de la biodigestión anaeróbica de residuos de café en una microturbina a gas, Pereira, 2020.
- [65] M. Á. Barrena Gurbillón y E. Olano Requielme, Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café (*Coffea arabica*) en el Distrito de Copallín, Bagua – Amazonas, Mendoza - Peru, 2017.
- [66] H. D. LONDOÑO ESPINOSA , APROVECHAMIENTO DE PULPA DE CAFÉ PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN UN REACTOR FLUJO PISTÓN, Medellín, 2017.
- [67] N. Rodriguez Valencia y J. Sanz Uribe, «Beneficios 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,» Bogotá , 2015.
- [68] J. P. Rojas Sossa, Evaluación de la producción de biogás por medio de la biodigestión anaerobia semicontinua utilizando residuos del beneficiado del café como sustrato., Costa Rica, 2015.
- [69] J. M. Machorro y E. Méndez, «Construcción y Uso de Biodigestor de Producción Energética y Reducción de Emisión de Gases de Efecto Invernadero.,» San Pedro, Sula, Cortes, Honduras, 2011.
- [70] Chilco, «Gas Pais,» 2021. [En línea]. Available: <https://gaspais.com.co/consumo-de-glp-en-colombia-2021/>.
- [71] U. d. P. m. energetica, «Proyeccion de demande de energéticos,» Bogota, 2022.
- [72] Colgas, «Suministro de gas licuado de petróleo en Colombia,» 2022.
- [73] A. Tobón Abello, «ANALISIS DE LOS POSIBLES FACTORES QUE DIFICULTAN LA IMPLEMENTACION DE BIODIGESTORES TIPO TUBULAR Y CUPULA FLOTANTE EN LAS ZONAS RURALES Y URBANAS DE LA REGION NORTE DE COLOMBIA,» Barranquilla, 2018.
- [74] C. A. Uribe Trujillo, «APROVECHAMIENTO TÉRMICO Y ELÉCTRICO DEL BIOGAS,» Universidad de Antioquia , Antioquia, 2020.
- [75] «Portal oficial del Estado argentino,» [En línea]. Available: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/accion/biodigestores#:~:text=Una%20vez%20que%20se%20mezclan,se%20puede%20aprovechar%20el%20biog%C3%A1s..> [Último acceso: 01 2024].
- [76] M. T. Varnero, M. Carú, . K. Galleguillos y P. Achondo, Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica, Santiago - Chile, 2012.
- [77] CONGRESO DE COLOMBIA, Ley 1715 de 2014, 2014, 13 de mayo.
- [78] B. Bharathiraja, T. Sudharsanaa y A. Bharghavi, «Biohydrogen and Biogas–An overview on feedstocks and enhancement process,» *Fuel*, vol. 185, pp. 810-828, 2016.

- [79] Z. Csereklyei, Q. Songze y T. Ancev, «The effect of wind and solar power generation on wholesale electricity prices in Australia,» *Energy Policy*, vol. 131, pp. 358-369.
- [80] J. A. Arboleda G., Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades., Medellín, Colombia, 2008.