

ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE DESECHOS DE CAFÉ VS DESECHOS PORCINOS EN LA FINCA "VILLA JULIANA" EN LA VEREDA EL MORAL DEL MUNICIPIO DE PÁRAMO, SANTANDER

Paula Daniela Chacón Ballesteros¹

Alexis Rodríguez Cañón²

¹Ingeniera Ambiental, ²Administrador público,

ISSN: 2590-6704

RESUMEN

Hoy en día el planeta sufre las graves consecuencias del cambio climático y el uso de energía de fuentes convencionales, provoca la emisión de gases contaminantes que aportan a el efecto invernadero, además de agotar los recursos no renovables; por lo tanto, la producción de biogás en biodigestores a partir de los desechos de las fincas, es una buena forma de lograr energía en el sector rural ayudando al planeta y a las personas.

El objetivo de este documento, es analizar de manera comparativa la producción de biogás a partir de dos clases de desechos, uno de origen vegetal y otro de origen animal, los cuales están disponibles en la Finca "Villa Juliana" en la Vereda El Moral del Municipio de Páramo, Santander, para lo cual se usarán los datos de cantidades de la finca y se calcula la producción de biogás de manera teórica, mediante un diseño a escala, con lo cual se pretende conocer la eficiencia del biodigestor a partir de los tipos de desechos utilizados como carga y algunas mezclas de ellos. Para el desarrollo de este proyecto, se tuvo en cuenta las falencias de las familias campesinas en cuanto a la debida disposición de los desechos del café, así como, los desechos de actividades porcícolas, las cuales se evidenciaron en la Provincia Guanentina, Santander

Así las cosas, dependiendo de la disponibilidad de la finca y sus condiciones de temperatura, se recomienda la implementación de biodigestores tubulares alimentados con desechos de origen animal, y en mezcla con desechos de origen vegetal, como los desechos del café y que se tenga en cuenta siempre la relación optima de diseño del biodigestor que recomiendan las guías citadas.

Palabras Clave: Biodigestor, Biogas, Tratamiento de residuos orgánicos.

ABSTRACT

Today the planet suffers the serious consequences of climate change and the use of energy from conventional sources causes the emission of polluted gases with the greenhouse effect, contributing to said change, in addition to depleting non-renewable resources; The production of biogas in biodigesters from farm waste is a good way to achieve energy in the rural sector, helping the planet and people.

The objective of this document is to analyze in a comparative way the production of biogas from two kinds of waste, one of vegetable origin and the other of animal origin, which are available at the "Villa Juliana" Farm in the Vereda El Moral of the Municipality of Páramo, Santander, for which the farm quantity data will be used and biogas production is calculated theoretically, through a scale

design, with which it is intended to know the efficiency of the biodigester from the types of waste. used as cargo and some mixtures of them. For the development of this project, the shortcomings of peasant families were taken into account in terms of the proper disposal of coffee waste, as well as waste from pig activities, which were evidenced in the Guanentina Province, Santander.

Thus, depending on the availability of the farm and its temperature conditions, the implementation of tubular biodigesters fed with waste of animal origin, and mixed with waste of vegetable origin such as coffee waste, is recommended, always taking into account the optimal biodigester design ratio recommended by the cited guides.

Keywords: *Biodigester, Biogas, Treatment of organic waste.*

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, a nivel global se enfrentan las graves y perjudiciales consecuencias del cambio climático, debido a las afectaciones del ambiente por el consumo indiscriminado de los recursos naturales como de la generación de gases contaminantes dados por la combustión de derivados del petróleo.

Colombia, en cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible ha desarrollado normatividad que incentiva la generación y uso de fuentes no convencionales de energía renovable, para contrarrestar los efectos en el ambiente del uso de energías de fuentes convencionales.

El municipio de Páramo, Santander se caracteriza por sus actividades agrícolas y pecuarias, por tanto, pretendemos realizar un análisis comparativo de la generación de biogás, a partir de las alternativas presentes en la región, como son los subproductos del café y los desechos porcinos.

La importancia de abordar el análisis comparativo de la producción de biogás, a partir de biodigestores alimentados con desechos orgánicos como el estiércol porcino y desechos del café como la pulpa, radica en que estos sectores están presentes en la región y son efectivos para el aprovechamiento de los residuos y la generación del propio combustible, para el uso de los agricultores en sus viviendas, además de disminuir con esta tecnología, la inadecuada disposición de dichos residuos.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 Marco teórico

El análisis que se realiza en este trabajo está orientado con ciertos conceptos que se retoman para dar claridad y dirección al desarrollo del mismo, por lo tanto, a continuación, se definen de la siguiente manera:

Para el desarrollo del análisis, el biogás es un gas que resulta del trabajo de microorganismos vivos y el cual se puede usar entre otras como fuente de energía calórica, útil en la cocción de alimentos sin emisión de contaminantes al ambiente.

Ahora bien, para la producción de dicho gas natural nos encontramos con el concepto del biodigester el cual, según Herrero (2008) “es un sistema natural que aprovecha la digestión anaerobia (en ausencia de oxígeno) de las bacterias que ya habitan en el estiércol, para transformar éste en biogás y fertilizante” (p.15).

De acuerdo con Gobierno de la Provincia de Santa Fe, (S.f.) los componentes de un biodigester son:

Reactor: El reactor corresponde al dispositivo principal donde ocurre el proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica. Los reactores de digestión pueden tener diferentes formas, como por ejemplo cilíndrica, cúbica,

ovoide o rectangular. Los digestores modernos tienen cubiertas, fijas o flotantes, cuya misión es conservar la temperatura, evitar la entrada de oxígeno y recoger el gas producido. Pueden estar contruidos de distintos materiales desde una piscina cubierta de polietileno de alta densidad, plástico, concreto hasta acero inoxidable. Dependiendo del diseño del reactor, éste podrá contar o no con un sistema de agitación.

Cámara de entrada o de carga: Es un dispositivo que facilita el proceso de alimentación o carga del biodigestor. Generalmente el afluente se coloca en el extremo superior del reactor; aunque también puede construirse una cámara pequeña donde se coloca lo que va a ingresar al biodigestor. También la carga puede almacenarse en tanques y luego bombearse o decantar hasta el reactor.

Salida del efluente: En un digestor de cubierta fija puede haber uno o varios tubos de salida colocados a distintos niveles, para la extracción del efluente. Por regla general, se elige aquel nivel que extraiga un efluente de mejor calidad (con la menor cantidad posible de sólidos). Adicionalmente, puede haber en la parte más baja del biodigestor una salida para lodos, pero no es muy utilizado, ya que se barre gran parte de la carga bacteriana del mismo.

Salida y sistema de gas: El sistema de gas lo traslada desde el biodigestor donde se produce hasta los quemadores o su uso final (Gobierno de la Provincia de Santa Fe, S.f, p.1).

Entonces tenemos el concepto de la digestión anaeróbica o biometanización, según Montalván Angélica (2015):

Es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla

de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno. Los estudios bioquímicos y microbiológicos, realizados hasta ahora dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas:

1. Hidrolisis: es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos. Por tanto, es el proceso de hidrolisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. La hidrolisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos.

2. Etapa fermentativa o acidogénica: Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metalogénicas (acético, fórmico, H₂) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por las bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no solo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema.

3. Etapa acetogénicas: Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H₂ y acético) y otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato (CH₃COO⁻) e hidrogeno (H₂), a través de las bacterias acetogénicas. Al contrario que las bacterias acetogénicas, estas no producen hidrogeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen

como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico, permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas. A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente.

4. Etapa metanogénica: Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización (Montalván Angélica (2015, pp. 19-20).

Otro concepto relevante del análisis es el de temperatura y tiempo de retención que según Jaime Martí Herrero (2008):

En el proceso de digestión anaerobia son las bacterias metanogénicas las que producen, en la parte final del proceso, metano. Existen diferentes poblaciones de bacterias metanogénicas y cada una de ellas requiere una temperatura para trabajar de forma óptima. Existen poblaciones metanogénicas que tienen su mayor rendimiento a 70°C de temperatura, pero para ello habría que calentar el lodo interior del biodigestor. Hay otras poblaciones que tienen su rango óptimo de trabajo de 30 a 35 °C. Estas temperaturas se pueden alcanzar en zonas tropicales de manera natural. La actividad de las bacterias desciende si estamos por encima o por debajo, del rango de temperaturas óptimas de trabajo.

En biodigestores sin sistema de calefacción, se depende de la temperatura ambiente que, en muchas regiones, es inferior al rango de temperaturas óptimas. A menores temperaturas, se sigue produciendo biogás, pero de manera más lenta. A temperaturas inferiores a 5°C, se puede decir que las bacterias quedan 'dormidas' y ya no producen biogás.

El tiempo de retención es la duración del proceso de digestión anaerobia, es el tiempo que requieren las bacterias para digerir el lodo y producir biogás. Este tiempo, por tanto, dependerá de la temperatura de la región donde se vaya a instalar el biodigestor. Así, a menores temperaturas, se requiere un mayor tiempo de retención que será necesario para que las bacterias que tendrán menor actividad, tengan tiempo de digerir el lodo y de producir biogás (Herrero, 2008, p.27).

Tabla 6. Tiempo de retención según temperatura

Región característica	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días)
Trópico	30	20
Valle	20	30
Altiplano	10	60

Nota. Tomado de Biodigestores Familiares, Guía de diseño y manual de instalación (p. 27), por Jaime Martí Herrero, 2008, GTZ-Energía, Bolivia.

Otro concepto relevante es el del biogás, que según la FAO (2019):

Es un gas compuesto principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), en proporciones variables dependiendo de la composición de la materia orgánica a partir de la cual se ha generado. Las principales fuentes de biogás son los residuos ganaderos y agroindustriales, los lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas y la fracción orgánica de los residuos domésticos.

La composición química del biogás depende del sustrato que se utilice para alimentar el biodigestor, de la tecnología utilizada y de la temperatura de procesos. Los componentes principales son:

Metano (CH₄): es un gas combustible que se encuentra con una concentración de entre 45% (a partir de la cual se considera que el biogás es inflamable) y 70% molar.

Dióxido de carbono (CO₂): es el segundo gas más importante por su proporción. Su concentración varía en un rango de 25% a 45% molar.

Sulfuro de hidrógeno (H₂S): es generado por microorganismos anaeróbicos reductores de sulfato ante la presencia de este, en cantidades que varían en función de la composición del sustrato utilizado para alimentar el biodigestor. Aún en muy bajas concentraciones, el H₂S es tóxico para humanos y animales, y altamente corrosivo: si no es eliminado del biogás, provoca una drástica disminución de la vida útil de los equipos donde se emplea. En una muestra cruda de biogás, el valor de H₂S puede variar en un rango entre 5000 y 50000 partes por millón (ppm).

Hidrógeno (H₂): normalmente, la concentración de este componente es inferior a las 5000 ppm.

Nitrógeno gaseoso (N₂): su presencia puede llegar a un máximo de 25% molar en biogases obtenidos de rellenos sanitarios; en sistemas con biodigestores, normalmente la concentración no supera el 5% molar.

Oxígeno (O₂): el máximo valor que puede alcanzar en el biogás es de 5% molar.

Agua (H₂O): es normal encontrar vapores de agua, especialmente cuando se trabaja con procesos termofílicos.

La composición del biogás, es la que determinará su poder calorífico, es decir, la cantidad de energía por unidad de masa o unidad de volumen de materia que puede desprenderse al producirse una reacción química de oxidación (FAO, 2019, pp. 23-24).

Por otro lado, al respecto de los desechos de origen vegetal, la definición que tomaremos de la pulpa de café es la expresada por la Federación de Cafeteros, en la revista CENICAFE por Rodríguez Nelson & Zambrano Diego (2010):

La pulpa de café es el primer producto que se obtiene en el procesamiento del fruto de café y representa en base húmeda alrededor del 43,58% del peso del fruto seco.

El promedio de la producción de pulpa es de 2.25 t/ha-año. Por cada millón de sacos de 60 Kg de café almendra que Colombia exporta, se generan 162.900 t de pulpa fresca, que si no se utilizan adecuadamente producirían una contaminación equivalente a la generada durante un año, con excretas y orina por una población de 868.736 habitantes (Rodríguez Nelson & Zambrano Diego, 2010, p. 2).

Es importante mencionar que, en el proceso de beneficio e industrialización del café, se genera un 92.4 % de pérdidas en desechos, según lo descrito por Rodríguez Nelson & Zambrano Diego (2010) adaptado de Calle Vélez H (1977), en la siguiente tabla:

Tabla 2. Residuos obtenidos en el proceso de beneficio e industrialización de 1 Kg de café cereza.

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

Nota: Tomado de *Los Subproductos del café: Fuente de energía renovable (p. 2)*, por Nelson Rodríguez & Diego Zambrano, 2010, CENICAFE, Chinchiná, Caldas, Colombia.

2.2 Marco Legal

La Constitución Política de Colombia, establece que es deber del Estado proteger la diversidad en integración del ambiente, planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales a fin de garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución y prevenir los factores de deterioro ambiental en cumplimiento de los artículos 79 y 80 de la Constitución Política, garantizando así el derecho a gozar de un ambiente sano.

La Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos, establecida en el CONPES 3874 de 2016, la cual está enfocada en la gestión de los residuos sólidos no peligrosos y “busca aportar al desarrollo sostenible y a la adaptación y mitigación del cambio climático, y plantea la base inicial para avanzar hacia la economía circular desde la gestión integral de residuos sólidos. A partir de esta, se quiere lograr que el valor de los productos y materiales se mantengan durante el mayor tiempo posible en el ciclo productivo, que los residuos y el uso de recursos se reduzcan al mínimo, y que los recursos se conserven dentro de la economía cuando un producto ha llegado al final de su vida útil, con el fin de

volverlos a utilizar repetidamente y seguir creando valor” (Consejo Nacional De Política Económica Y Social, 2016, p.11).

En Colombia la Ley 1715 de 2014 promueve con incentivos tributarios, la generación y uso de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable FNCE y lo contempla en su artículo séptimo así: “El Gobierno Nacional promoverá la generación con FNCE y la gestión eficiente de la energía mediante la expedición de los lineamientos de política energética, regulación técnica y económica, beneficios fiscales, campañas publicitarias y demás actividades necesarias, conforme a las competencias y principios establecidos en esta ley y las Leyes 142 y 143 de 1994”.

Igualmente, el Estatuto tributario en su artículo 256 modificado por el artículo 171 de la Ley 1955 de 2019 contempla el “descuento para inversiones realizadas en investigación, desarrollo tecnológico o innovación y ofrece a los inversionistas que tendrán derecho a descontar de su impuesto sobre la renta a cargo el 25% del valor invertido en dichos proyectos en el período gravable en que se realizó la inversión”.

Por último, con relación a la regulación del combustible con biogás, Colombia a través de la Comisión de Regulación de Energía y Gas, expidió la Resolución 135 del 16 de noviembre de 2012, por la cual se adoptan normas aplicables al servicio público domiciliario de gas combustible con biogás, donde se encuentra el régimen de las actividades relacionadas con el biogás.

3. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto, se tuvo en cuenta las falencias de las familias campesinas en cuanto a la debida disposición de los desechos del café, así como, los desechos de actividades porcícolas, las cuales se evidenciaron en la Provincia Guanentina, Santander.

Para lograr el análisis comparativo de la producción de biogás, a partir de la descomposición de sustancias de origen animal y vegetal, como lo son el estiércol porcino y la pulpa de café, se realizó una búsqueda de la información documentada que contribuyera al análisis, encontrando y seleccionando veinte documentos tanto de las bases de datos de la biblioteca de la Universidad Libre de Colombia, seccional Socorro, como de otros orígenes en la Web.

Después de analizar la información documentada, se determinaron las variables a usar en el análisis, para medir la eficiencia, las ventajas y desventajas de los procesos propuestos y estas variables son las siguientes:

Tabla 3. Variables del análisis comparativo.

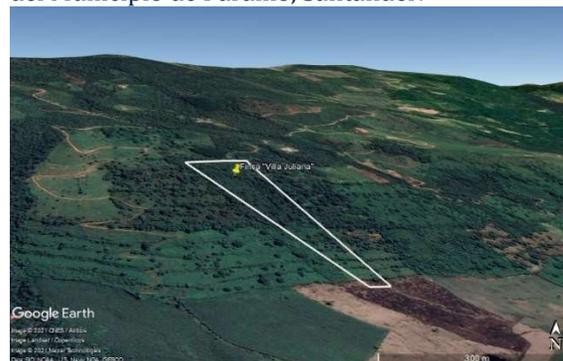
Variable	Tipo de producto para Carga (animal - vegetal)	Temperatura	Tiempo de Retención	Biogás producido	Carga Diaria
Rango	1-100	10-30	20-60	100-300	1-6
Unidades	%	° C	días	litros	Kg

Fuente: Elaboración propia

Se toma la conversión de 1 m³ de CH₄ (Metano) que equivale a 3.8 kW/h de energía calórica (Castro Molano, Parrales Ramírez, & Escalante Hernández, 2019).

Igualmente, se realizaron consultas en la Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral del Municipio de Páramo, Santander (ver Figura 1). Para establecer las cantidades del cultivo de café existente y con ellos proyectar el sistema de indigestión a partir de los desechos del café, los cuales se calculan de acuerdo a los datos obtenidos en el proceso e industrialización de 1 kg de café cereza según lo descrito por Rodríguez Nelson & Zambrano Diego (2010) adaptado de Calle Vélez H (1977) ver Tabla 2.

Figura 1. Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral del Municipio de Páramo, Santander.



Nota: Tomado de Google Earth Pro, 2021.

Los datos consultados de la Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral del Municipio de Páramo, Santander, se observan en la Tabla

Tabla 7. Datos iniciales del cultivo de café de la Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral del Municipio de Páramo, Santander.

Área de Cultivo (Ha)	Cantidad de Plantas (Und)	Cosecha de Café Fruta (Kg)	Cosecha de Café Pergamino (Kg)
1.25	7000	8750	1875

Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Cultivo de Café Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral, del Municipio de Páramo, Santander Cultivo de Café Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral, del Municipio de Páramo, Santander.



Fuente: Autores

Una vez calculados las cantidades disponibles de pulpa y mucilago de café, en la finca mencionada, se procede a formular y calcular teóricamente la construcción de los biodigestores tubulares de bajo costo, uno, alimentado con cargas de mezcla de productos de origen vegetal y el otro con productos de origen animal, de acuerdo a la guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares propuesto por Jaime Martí Herrero (2008), teniendo en cuenta las especificaciones particulares del lugar como temperatura, altura sobre el nivel del mar y otras.

Para los datos del biodigestor alimentado con productos en descomposición de origen animal usaremos la metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de la guía de diseño y manual de

instalación de biodigestores familiares propuesto por Jaime Martí Herrero (2008).

Figura 3. Actividad Porcícolas.



Fuente: Autores

Los datos de línea base los tomaremos de acuerdo a la producción de estiércol diaria según, el peso del cerdo calculada igualmente por Jaime Martí Herrero (2008), la cual corresponde a “4 kg de estiércol fresco diario producido por cada 100kg de peso del animal” (Herrero, 2008, p. 8).

Finalmente, se analizan los resultados teóricos, en cuanto a los costos necesarios para la construcción y operación de los biodigestores y el posible nivel de eficiencia, bajo condiciones deseables y las ventajas y desventajas de las dos opciones.

4. RESULTADOS

4.1 Cálculo de desechos del cultivo de café

Se calculan los datos de cantidad de subproductos del café, como la pulpa y el mucilago, resultante del cultivo de la finca “Villa Juliana” que tiene un área cultivada de 1.25 hectáreas con 7000 plantas de café, que producen 8750 Kg de café cereza en los meses de cosecha principal que se presenta en los meses de octubre, noviembre y diciembre, de los cuales quedarían 3813,25 kg de pulpa de café que corresponde al 43.58% del total del café cereza recogido en la cosecha, porcentaje descrito por el programa de investigación científica del Fondo Nacional de Cafeteros por Rodríguez Valencia & Zambrano Franco (2010)(p.2).

La disposición de dichos residuos debe ser objeto de tratamiento y buenas prácticas, ya sea en compostaje u otras formas de disposición final responsable, algunos productores consultados expresaron que realizan el tratamiento a la pulpa aplicándole cal o ceniza y disponiéndola en lugares para compostaje y otros la enterraban directamente en la tierra.

Por tanto, se obtuvo una disponibilidad mensual de pulpa de café de 1.271 kg, lo equivalente a una disponibilidad diaria de 42.37 kg, en época de cosecha.

Por otro lado, la disponibilidad mensual de mucilago de café es de 433.13 kg, equivalente a una disponibilidad diaria de 14.44 kg en época de cosecha.

Tabla 8. Disponibilidad diaria de residuos de café en la finca “Villa Juliana”

Producto	Kg/mes	Kg/día
Pulpa de café	1.271	42.37
Mucilago de café	433.13	14.44

Fuente: Elaboración propia

4.2 Calculo y Formulación del Biodigestor Cargado con Mezclas de Origen Vegetal

4.2.1 Biodigestor Alimentado con Subproductos del Café

Aplicando la guía de diseño y manual de instalación de Biodigestores familiares propuesto por Jaime Martí Herrero (2008) se calcula el volumen total del Biodigestor: “El volumen total del biodigestor ha de albergar una parte líquida y otra gaseosa. Normalmente se da un espacio del 75% del volumen total a la fase líquida, y del 25% restante a la fase gaseosa. El volumen total es la suma del volumen gaseoso y el volumen líquido” (Herrero, 2008, p. 29), así:

$$VT = VG + VL$$

Y por tanto el volumen líquido es tres cuartas partes del total:

$$VL = VT \times 0.75$$

El volumen gaseoso es una cuarta parte del total:

$$VG = VT \times 0.25$$

Y el volumen gaseoso será igual a una tercera parte del volumen líquido:

$$VG = VL \div 3 \text{ (Herrero, 2008, p.29)}$$

Para el análisis teórico a escala, tomaremos una carga diaria igual al 10% de la cantidad disponible diaria de residuos de café de la finca “Villa Juliana”, es decir 4.23 kg de pulpa de café y 1.44 kg de mucilago, para una mezcla total de 5.67 kg de residuos de café y utilizando la concentración 4:1, le adicionamos 4 partes de agua que serían 22.68 litros, para una carga diaria de 28.35 litros.

La aplicación está dirigida a la Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral del municipio

de Páramo, Santander, donde se cuenta con una temperatura promedio de 20°C, su altura sobre el nivel del mar es de 1539.18 msnm y cuenta con una zona de vida de Bosque Húmedo Pre-Montano, según el Sistema de Información Geográfica de la CAS, por lo tanto se toma el tiempo de retención igual a 37 días, aplicando la guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares de Jaime Martí Herrero (2008)(p. 32).

Ya “que el biodigestor tubular es de flujo continuo, el volumen liquido V L será el resultado de multiplicar el tiempo de retención por la carga diaria” (Herrero, 2008, p. 29):

$$V L = 37 \times 28.35$$

$$V L = 1048.45 \text{ litros}$$

Ahora, para determinar el volumen gaseoso V G se divide el volumen liquido V L en 3:

$$V G = V L / 3$$

$$V G = 1048.45 / 3$$

$$V G = 349.48 \text{ litros}$$

Entonces el volumen total V T será igual a la sumatoria del volumen líquido y el volumen gaseoso:

$$V T = V L + V G$$

$$V T = 1048.45 + 349.48$$

$$V T = 1397.93 \text{ litros}$$

Ahora con la selección de esta medida de ancho del polietileno la relación optima entre el diámetro y la longitud sería igual a $L/d = 4.38 / 0.64 = 6.84$, cumpliendo con los parámetros de diseño óptimo.

Las investigaciones realizadas se han obtenido resultados de rendimiento de 25 litros de biogás por 1 kg de mezcla pulpa fresca alimentada en los biodigestores (Arcila O, 1979), entonces podría decirse en teoría que la producción del modelo de biodigestor a base de pulpa sería de $5.67 \times 25 = 141.75$ litros de biogás diario.

Se recomienda para iniciar la fase de fermentación adicionar estiércol (bovino o porcino) para que las bacterias presentes en este, aceleren el proceso, esta recomendación se toma de (Calle Velez H. ,1974).

4.3 Cálculo y Formulación del Biodigestor Cargado con desechos de Origen Animal

4.3.1 Biodigestor Alimentado con Estiércol Porcino

Según la Guía de diseño y manual de instalación de Biodigestores familiares propuesto por Jaime Martí Herrero (2008), el “estiércol que mayor cantidad de biogás produce es el del chanco y el humano” (Herrero, 2008, p.27).

Tomaremos como valor base de producción de estiércol porcino diario, el calculado por Jaime Martí Herrero, 2008, según el peso del animal (ver Tabla 8).

Tabla 8. Producción de estiércol fresco diario.
Producción de estiércol fresco diario.

Ganado	Kg de estiércol fresco producido por cada 100 kg de peso del animal
Cerdo	4
Bovino	8
Caprino	4
Conejos	3
Equino	7
Humano adulto	0,4 kg por adulto
Humano niño	0,2 kg por niño

Fuente: Tomado de Biodigestores Familiares, Guía de diseño y manual de instalación (p. 28), por Jaime Martí Herrero, 2008, GTZ-Energía, Bolivia.

Por tanto, en nuestro caso para desarrollar el análisis comparativo tomaremos una cantidad de carga diaria igual a la carga diaria planteada para la mezcla de desechos de origen vegetal, es decir, de 5.67 kg, lo cual correspondería al

estiércol producido por dos cerdos de 70 kg aprox. lo cual se calculó de la siguiente manera:

$$4 \times 100$$

$$5.67 \times$$

$$X = 5.67 \times 100 / 4 = 141.75$$

Entonces, para este diseño se necesitan dos cerdos de 70 kg de peso.

Aplicando la guía de diseño y manual de instalación de Biodigestores familiares propuesto por Jaime Martí Herrero (2008) se calcula el volumen tal del Biodigestor: "El volumen total del biodigestor ha de albergar una parte líquida y otra gaseosa. Normalmente se da un espacio del 75% del volumen total a la fase líquida, y del 25% restante a la fase gaseosa. El volumen total es la suma del volumen gaseoso y el volumen líquido" (Herrero, 2008, p. 29), así:

$$VT = VG + VL$$

Y por tanto el volumen líquido es tres cuartas partes del total:

$$VL = VT \times 0.75$$

El volumen gaseoso es una cuarta parte del total:

$$VG = VT \times 0.25$$

Y el volumen gaseoso será igual a una tercera parte del volumen líquido:

$$VG = VL \div 3 \text{ (Herrero, 2008, p. 29).}$$

Para el análisis teórico presente, tomaremos una carga diaria igual a la producción de estiércol fresco diario de dos cerdos con un peso de 70 kg c/u y que producirían según la guía, unos 5.67 kg de estiércol diario y utilizando la concentración 4:1, le adicionamos 4 partes de agua que serían 22.68 litros, para una carga diaria de 28.35 litros.

La aplicación está dirigida a la Finca "Villa Juliana" en la Vereda El Moral del Municipio de

Páramo, Santander, donde se cuenta con una temperatura promedio de 20°C, su altura sobre el nivel del mar es de 1438 msnm y cuenta con una cobertura vegetal de bosque subandino, según el Sistema de Información Geográfica de la CAS, por lo tanto se toma el tiempo de retención igual a 37 días, aplicando la guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares de Jaime Martí Herrero (2008)(p. 32).

Calculamos el volumen líquido V L del biodigestor tubular de flujo continuo, el cual "será el resultado de multiplicar el tiempo de retención por la carga diaria" (Herrero, 2008, p. 29):

$$V L = 37 \times 28.35$$

$$V L = 1048.45 \text{ litros}$$

Ahora, para determinar el volumen gaseoso V G se divide el volumen líquido V L en 3:

$$V G = V L / 3$$

$$V G = 1048.45 / 3$$

$$V G = 349.48 \text{ litros}$$

Entonces el volumen total V T será igual a la sumatoria del volumen líquido y el volumen gaseoso:

$$V T = V L + V G$$

$$V T = 1048.45 + 349.48$$

$$V T = 1397.93 \text{ litros}$$

En este momento, ya conocido el volumen total necesario, se procede a determinar las dimensiones del biodigestor tubular, comenzando por la longitud y el radio del mismo.

El volumen total V L requerido en M3 sería igual a 1.4 M3, en la ciudad de Bogotá se encuentra el polietileno tubular de un ancho de rollo de 1 metros, con un calibre de 8 mm con las siguientes especificaciones:

Tabla 9. Especificaciones del Rollo de Polietileno tubular con relación óptima para uso con desechos de origen animal.

Ancho de Rollo (m)	Perímetro de la circunferencia (m)	Radio (m)	Diámetro (m)
1	2	0.32	0.64

Fuente: Elaboración propia

En este punto, evaluaremos la relación optima entre longitud y diámetro del biodigestor para lograr el volumen total requerido pues como lo dice (Herrero, 2008) “no conviene biodigestores demasiado cortos ni largos y para ello existe una relación optima entre el diámetro y la longitud que es 7 (..) Esta relación es flexible en un rango de 5 - 10, siendo la mejor 7” (Herrero, 2008, p.36).

Y tendríamos que:

$$\text{Sección eficaz} = \pi \times r^2$$

$$\text{Sección eficaz} = 3.1416 \times 0.32^2$$

$$\text{Sección eficaz} = 0.32 \text{ m}^2$$

Ahora despejamos L de la formula $VT = \pi \times r^2 \times L$ teniendo que $L = VT / (\pi \times r^2)$ y tendríamos:

$$L = VT / (\pi \times r^2)$$

$$L = 1.4 \text{ M}^3 / 0.32 \text{ m}^2$$

$$L = 4.38 \text{ m}$$

Ahora con la selección de esta medida de ancho del polietileno la relación optima entre el diámetro y la longitud sería igual a $L/d = 4.38 / 0.64 = 6.84$, cumpliendo con los parámetros de **diseño óptimo**.

Las investigaciones realizadas se han obtenido resultados de producción de biogás de las cuales hemos considerado la estimación realizada por (Herrero, 2008) quien dijo en su momento que:

Existen diferentes métodos para estimar la producción de biogás de un biodigestor según su carga diaria de estiércol, pero aquí se presenta lo que se denomina un “**número mágico**” para realizar este cálculo de forma sencilla.

La estimación de este “**número mágico**” se realiza a través de los conceptos de “**sólidos totales**” y “**sólidos volátiles**”. En la estimación se han considerado valores medios y por tanto el empleo de este “**número mágico**” sirve para tener una idea aproximada del volumen de biogás, generado por día siempre que se cumplan los tiempos de retención adecuados a cada temperatura de trabajo (Herrero, 2008, p. 30).

Tabla 10. Producción de biogás

Ganado	Número mágico (litros de biogás producidos por día por kilo de estiércol fresco cargado diariamente)
Cerdo	51
Bovino	35.3

Fuente: Tomado de Biodigestores Familiares, Guía de diseño y manual de instalación (p.30), por Jaime Martí Herrero, 2008, GTZ-Energía, Bolivia.

Entonces tendríamos que el resultado de la producción de biogás diario a base de estiércol de cerdo sería igual a multiplicar la carga de estiércol diaria por el número mágico correspondiente al cerdo:

$$5.67 * 51 = \mathbf{289.17} \text{ litros diario de biogás.}$$

La alimentación del cerdo es clave para la eficiencia en la producción del biogás, ya que la experiencia ha demostrado que la alimentación a base de purinas produce menor cantidad de bacterias generadoras de biogás. Es factible que la alimentación de los cerdos, sea con productos propios de la finca que favorecen el proceso de generación de mayor cantidad de bacterias.

Tendríamos que la mayor producción de biogás sería el resultado de cargar el biodigestor con estiércol porcino así:

$$\text{Desechos de café} = \mathbf{141.75} \text{ litros de biogás diario}$$

Estiércol porcino = **289.17** litros diario de biogás.

Ahora, si se hiciera una mezcla de carga al 50 % combinando desechos de origen animal (estiércol porcino) con desechos de origen vegetal (desechos del café) se obtendría:

$$5.67 / 2 = 2.84$$

$$5.67 / 2 = 2.84$$

$$(2.84 * 51) + (25 * 2.84) = 144.84 + 71 = \mathbf{215.84}$$

litros diario de biogás.

Este resultado con una carga diaria mezclada al 50% animal y 50% vegetal, requeriría un solo cerdo de 70 kg de peso aproximadamente.

Mezcla para carga diaria de 70% de origen animal y 30 % de origen vegetal:

$$5.67 * 70\% = 3.97 \text{ estiércol} * 51 = 202.47$$

$$5.67 * 30\% = 1.70 \text{ desecho café} * 25 = 42.5$$

$$\text{Mezcla } 70 : 30 = \mathbf{244.97}$$

litros diarios de biogás.

Mezcla para carga diaria de 70% de origen vegetal y 30 % de origen animal:

$$5.67 * 70\% = 3.97 \text{ desechos de café} * 25 = 99.25$$

$$5.67 * 30\% = 1.70 \text{ estiércol porcino} * 51 = 86.7$$

$$\text{Mezcla } 30 : 70 = \mathbf{185.95}$$

litros de biogás diario

A continuación, se muestran los resultados del análisis teórico aplicado en la Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral del Municipio de Páramo, Santander:

Tabla 11. Variables del análisis comparativo.

Tipo de producto para Carga	Temperatura (° C)	Tiempo de Retención (días)	Carga Diaria (Kg)	Biogás producido (litros)
Desechos de Café (vegetal)	20	37	5.67	141.75

Tipo de producto para Carga	Temperatura (° C)	Tiempo de Retención (días)	Carga Diaria (Kg)	Biogás producido (litros)
Estiércol Porcino (animal)	20	37	5.67	289.17

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo anterior, obtenemos que para el caso del desarrollo de un biodigestor alimentado con una carga diaria de 5.67 kg de desechos de café, a una temperatura ambiente promedio de 20 °C correspondiente al municipio de Páramo, Santander con un tiempo de retención de 37 días, se obtendría en teoría **141.75** litros de biogás diario. Por otro lado, para una carga diaria de 5.67 kg de desechos porcinos, con la misma condición de temperatura, tiempo de retención y en el mismo tamaño del biodigestor, se obtendría en teoría **289.17** litros de biogás, lo cual representa un aumento de **104 %** con relación al de desechos de café.

Ahora, para el caso del biodigestor alimentado con una mezcla de 50% de desechos de café y 50% de desechos porcinos, bajo las mismas condiciones de temperatura y retención se obtendría teóricamente **215.84** litros de biogás diario, lo cual representa un aumento con relación al biodigestor de desechos de café en **52.27%** y una disminución del **25.36%** con relación al biodigestor a base de desechos porcinos.

Para el caso de la mezcla a base de un **70%** de desechos de porcinos y un **30%** de desechos de café, bajo iguales condiciones de temperatura y retención, se obtendría **244.97** litros de biogás diario, lo cual representa un aumento con relación al biodigestor de desechos de café en **72.82%** y una disminución del **15.30%** con relación al biodigestor a base de desechos porcinos.

Finalmente, para el caso de la utilización de una carga mezclada con un **70%** de desechos de café con un **30%** de desechos porcinos, se obtendría teóricamente **185.95** litros de

biogás diario, lo cual representa un aumento con relación al biodigestor de desechos de café en **31.18%** y una disminución del **35.70%** con relación al biodigestor a base de desechos porcinos.

Según los resultados obtenidos, el bienestar más eficiente según el tipo de carga diaria es a base de desecho animal para este caso estiércol porcino, el cual se obtendría de 2 cerdos de aproximadamente **70 kg** de peso.

Para el caso de contar con un solo cerdo de 70 kg de peso, sería viable el biodigestor a base de mezcla de 50 % de desechos porcino y 50 % de desecho de café, la cual disminuiría solo un 25.36 % la cantidad de biogás producido respecto al más eficiente.

4.4 Análisis Comparativo de los Costos de Construcción del Biodigestor Tubular Alimentado a Base de Desechos de Café y de Estiércol Porcino

De acuerdo a los cálculos resultantes de la estimación del volumen total requerido $V_T = 1397.93$ litros, el biodigestor con una relación optima entre diámetro y longitud nos arrojó un diseño a escala con las siguientes dimensiones:

Tabla 12. Dimensiones del Biodigestor propuesto

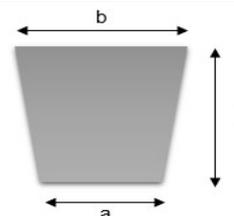
Ancho de Rollo (m)	Longitud (m)	Perímetro de la circunferencia (m)	Radio (m)	Diámetro (m)
1	4.38	2	0.32	0.64

Fuente: Elaboración propia.

Igualmente, basado en Herrero (2008) la dimensión de la “zanja según el ancho del Rollo” (Herrero, 2008, p.37) pueden ser las siguientes:

Tabla 12. Dimensiones de la zanja según el Ancho de Rollo (AR)

AR (m)	2	1.75	1.5	1.25	1
a (m)	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
b (m)	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
p (m)	1	0.9	0.8	0.7	0.5



Fuente: Tomado de Biodigestores Familiares, Guía de diseño y manual de instalación (p.37), por Jaime Martí Herrero, 2008, GTZ-Energía, Bolivia.

Como podemos ver en el caso nuestro, la zanja quedaría de 60 cm de profundidad (p), 30 cm de ancho en el fondo de la zanja (a) y 50 cm de ancho en la boca de la zanja(b), todas las medidas por la longitud calculada que es de 4.38 metros.

Así las cosas y estimando una distancia de 15 metros de la cochera al biodigestor y 10 metros de éste a la cocina del hogar, los materiales necesarios y sus costos serían los siguientes:

Tabla 14. Presupuesto para construcción de Biodigestor Tubular de Polietileno a precios de 2021.

Material	Cantidad	Precio Unitario (Pesos)	Precio Total (Pesos)
Tubería de 4" PVC	15 m	20.000	300.000
Codos de 4" PVC	2	9.800	19.600
Tubería de 1/2" PVC	12m	3.700	44.400
Adaptador hembra de 1/2 " PVC	1	500	500
Adaptador macho de 1/2 "PVC	1	500	500
Registro de paso de 1/2"	5	4500	22.500
Tee PVC 1/2"	4	750	3.000
Codo PVC 1/2"	4	600	2.400
Teflón	2	800	1.600
Soldadura PVC x 118 ml	1	28.900	28.900
Miple galvanizado 1/2" de 15 cm	4	3.500	14.000
Tubo galvanizado de 1/2", 10 cm	5	1.500	7.500
Codo galvanizado 1/2"	4	2.300	9.200
Liga de Neumático	40 m	500	20.000
Polietileno tubular (8mm, AR 1.00m)	8.76m	16.800	147.200
Polisombra	5m	4.000	20.000
TOTAL			639.700

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Modelo de biodigestor tubular en polietileno.

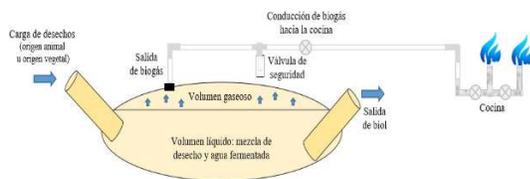


Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se usan otros materiales reciclados de la finca como: paja o tierra para el fondo de la zanja, lonas o plásticos reutilizados para las paredes de la zanja, alambre y lazo para fijar las tuberías de entrada y salida.

Para las diferentes mezclas de carga del biodigestor, se usan los mismos costos en la fabricación del biodigestor, teniendo previamente disponible la cochera y un punto de almacenamiento de los desechos del café y esto debido a que el cálculo realizado contiene un mismo volumen total de diseño para todas las opciones de mezcla.

Figura 3. Esquema del Biodigestor familiar y la conducción del biogás a la cocina.



Fuente: Adaptado de Biodigestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación. (p. 51), por J. M. Herrero, 2008, GTZ- Energía. Bolivia.

Finalmente, al respecto de la relación Carbono/Nitrógeno, se ha dicho que la relación de contenido de carbono y nitrógeno de las materias primas que se utilizaran para la digestión anaeróbica dentro del biodigestor influye en gran medida en la producción de biogás debido a que, según Montalván Angélica Auxiliadora (2015), “las bacterias

metanogénicas consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1, y concibe para el caso de estiércol fresco de cerdo una relación de 13:1, para el estiércol de vaca una relación de 25:1 y para la pulpa de café una relación de 20:1 según su estudio” (Montalván Angélica Auxiliadora, 2015, p. 36).

Sin embargo, por el contrario, otros estudios prácticos han documentado que la producción de biogás es más eficiente a partir del estiércol de cerdo, como es el caso de la guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares desarrollado por Jaime Martí Herrero (2008), donde para estimar la producción de biogás conociendo la carga diaria propone: “el uso de un “número mágico” que resulta de los conceptos de sólidos totales y volátiles y que multiplicado por la carga diaria se tendría una idea aproximada del biogás generado, y resulta sobresaliente que el número planteado para la producción de biogás a partir del estiércol de cerdo es mayor (51) que el planteado a partir de estiércol bovino (35.5)” (Herrero, 2008, p. 30).

5. CONCLUSIONES

El análisis teórico de la generación de biogás a partir de desechos vegetales y desechos animales, estima una aproximación de la cantidad de biogás que generaría cada opción de carga en un biodigestor, teniendo en cuenta la disponibilidad de esta en la Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral, del Municipio de Páramo, Santander.

La producción de biogás a partir de desechos de café, está condicionada por diversas variables, principalmente por variables directas como la cantidad de cultivo, la obtención de café cereza, la disponibilidad del desecho y los tiempos de producción.

En el caso de los desechos de café, según la teoría la pulpa de café representa un 43.6% y el mucilago un 14.9% del total de la cosecha,

razón por la cual su uso en biodigestores sería una buena solución a la disposición final de esta, con el valor agregado de producción de biogás.

En la finca “Villa Juliana” se tiene un área de 1.25 hectáreas cultivadas de café, con siete mil plantas que producen 3813,25 kg de pulpa de café durante los meses de producción, lo que representa una disponibilidad diaria de 42.37 kg de carga para el biodigestor.

Para el cálculo, se usó un diez por ciento de la disponibilidad diaria de desechos de café resultando una producción de 141.75 litros diarios de biogás.

Con respecto a la producción de biogás con carga de estiércol porcino, es necesario contar con dos cerdos de 70 kg para obtener la misma cantidad de carga de desechos de café; este tipo de carga está condicionado al tipo de alimento del animal, siendo más óptimo la alimentación con residuos orgánicos debido a que produce mayor número de bacterias. El resultado obtenido de acuerdo, a la producción de biogás con desechos porcinos es de 289.17 litros diarios de biogás.

Se determina de manera teórica que, en la Finca “Villa Juliana” en la Vereda El Moral, del Municipio de Páramo, Santander, teniendo en cuenta sus condiciones de temperatura, la mayor cantidad de biogás producido se obtiene de la carga diaria del biodigestor con desechos de origen animal, más exactamente con estiércol porcino con un tiempo de retención de treinta y siete días. El aumento en la producción representa un 104 % con relación a la producción con desechos de café.

Se obtuvo como segundo mejor resultado en producción de biogás una carga diaria del biodigestor producto de la mezcla del setenta por ciento de estiércol porcino y el treinta por ciento de desechos del café, con lo cual se reduciría el número de cerdos utilizados y se obtendría 244.97 litros de biogás diario.

En tercer lugar, con una mezcla del cincuenta por ciento de desechos de café y cincuenta por ciento de estiércol porcino, se obtiene 215.84 litros de biogás diario.

Finamente una mezcla del setenta por ciento de desechos de café con el treinta por ciento de desechos porcinos, se obtiene 185.95 litros de biogás diario.

De acuerdo, a los resultados obtenidos la decisión del tipo de carga del biodigestor dependerá de condiciones como: la época de cosecha del café, de la disponibilidad de animales de la granja y la demanda de biogás de la finca, pues se aclara que el presente análisis está hecho a escala y se usan datos de la cosecha de café existente en la finca “Villa Juliana”.

Se pudo concluir que las indicaciones recurrentes de los diferentes autores consultados, coinciden en la implementación de biodigestores tubulares, usando polietileno tubular y accesorios de PVC que en conjunto resultan en un menor costo de construcción que para el caso propuesto se calculó en seiscientos treinta y nueve mil setecientos pesos, correspondiente a los materiales a utilizar.

El uso de biodigestores tubulares, es un sistema que permite la generación de biogás a partir de desechos de café y desechos porcinos contribuyendo con la disminución del impacto ambiental que causan dichos desechos en su disposición directa al suelo y agua, se convierte en una alternativa de sostenibilidad, progreso y economía en las comunidades campesinas.

6. BIBLIOGRAFÍA

Amante-Orozco, A., Martínez-Esquivel, R., Rössel-Kipping, E. D., Pimentel-López, J., García-Herrera, E. J., & Gómez-González, A. (abril 2019). Digestión anaerobia de estiércol de ovino para producir biogás y bioabono.

- Agroproductividad Vol. 12 Num. 4, 39-43.*
- Arcila O, F. (1979). Produccion de biogas a base de pulpa de café. *CENICAFE*, 17.
- Calle Velez, H. (1974). Como producir gas combustible con pulpa de café. *Boletin Tecnico No. 3*, 7-8.
- Calle Velez, H. (1977). Subproductos del café. *CENICAFE*, 84.
- Campos Cuni, B. (2011). Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino. *Ciencias Tecnicas Agropecuarias, Vol 20, No. 2*, 37-41.
- CAS. (1 de Noviembre de 2021). *Corporacion Autonoma Regional de Santander*. Obtenido de Corporacion Autonoma Regional de Santander: <http://cas.gov.co/index.php>
- Castro Molano, L. d., Parrales Ramirez, Y. A., & Escalante Hernandez, H. (2019). Co-digestión anaerobia de estiércoles bovino, porcino y equino como alternativa para mejorar el potencial energético en digestores domésticos. *Revista ION*, 9.
- Comite De Cafeteros De Santander. (2021). *santander.federaciondecafeteros.org*. Obtenido de [santander.federaciondecafeteros.org](https://santander.federaciondecafeteros.org/caffe-de-santander/): <https://santander.federaciondecafeteros.org/caffe-de-santander/>
- Consejo Nacional De Politica Economica Y Social. (21 de noviembre de 2016). *DNP*. Obtenido de DNP: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>
- FAO. (2019). *Guia teorico-practica sobre el biogas y los biodigestores*. Buenos Aires, Argentina: FAO.
- Gobierno de la Provincia de Santa Fe. (S.f.). Biodigestores y operacion de plantas de biogás. En G. d. Santa Fe, *Operacion y mantenimiento de biodigestores* (pág. 1). Provincia de Santa Fe, Argentina: Academia de la renovable.
- Google Earth Pro. (29 de noviembre de 2021). *Google Earth Pro*. Obtenido de Google EarthPro:https://earth.google.com/web/@4.00000000,-72.00000000,11002532.62566398a,0d,35y,-0.0000h,0.0000t,0.0000r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=es-419
- Herrero, J. M. (2008). *Biodigestores familiares. Guia de diseño y manual de instalación*. La Paz, Bolivia: GTZ- Energía. Bolivia.
- Montalván Angélica Auxiliadora, Z. R. (Mayo de 2015). Produccion de biogas a partir de la pulpa de café con proptotipo de generador electrico. Nicaragua: Universidad Nacional de Ingenieria.
- Red BioLAC. (23-26 de abril de 2016). *secureservercdn.net*. Obtenido de [secureservercdn.net](https://secureservercdn.net/198.71.233.129/kvj.0fe.myftpupload.com/wp-content/uploads/2020/04/Plan-Estrat%C3%A9gico-Red-BioLAC-2016-2025.pdf): <https://secureservercdn.net/198.71.233.129/kvj.0fe.myftpupload.com/wp-content/uploads/2020/04/Plan-Estrat%C3%A9gico-Red-BioLAC-2016-2025.pdf>
- Rodriguez Valencia, N., & Zambrano Franco, D. A. (2010). Los subproductos del cafe: Fuente de energía renovable. *CENICAFE AVANCES TECNICOS* 393, 2.
- Rodriguez, N., & Zambrano, D. (2010). Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. *CENICAFE*, 1-8.