

| | | | |
|--|--|----------------|---------------------------|
| Fecha de elaboración: 10.04.2023 | | | |
| Tipo de documento | TID: | Obra Creación: | Proyecto Investigación: X |
| Título | Estudio de viabilidad técnico - financiera de la implementación de un biodigestor tubular en la finca el Líbano, Cepitá – Santander. | | |
| Autor(es) | Laura Lisseth Monsalve Herrera Omar Fernando Quiñonez Bolívar | | |
| Tutor(es) | Juan Carlos Guzmán Gómez | | |
| Fecha de finalización | 28.04.2023 | | |
| Temática | Generación de Biogás | | |
| Tipo de investigación | No Experimental | | |
| Resumen | | | |
| <p>El presente proyecto de investigación busca ser una alternativa para la generación de gas a partir del estiércol de porcinos por medio de la implementación de un biodigestor, siendo esta una solución que contribuye con la sostenibilidad económica, ambiental y social para las comunidades que habitan zonas veredales que no cuentan con el servicio público del gas.</p> <p>Inicialmente, se realizó una investigación acerca de casos de estudio donde se tuvieran experiencias exitosas respecto al funcionamiento de biodigestores tubulares en Colombia alimentados con estiércol de porcino, logrando obtener información que permitió ser un referente y mediante las lecciones aprendidas se logró contextualizar en el caso de estudio.</p> <p>Una vez se identificaron los casos de estudio, se realizó el análisis técnico determinando los parámetros mínimos requeridos para la implementación del biodigestor, identificando las características geográficas, condiciones y especificaciones técnicas necesarias y realizando su respectivo análisis de cumplimiento de estos en la finca el Líbano.</p> <p>Seguidamente, se establecieron los costos asociados al biodigestor tubular y se realizó un análisis financiero comparativo de dos escenarios, uno donde se evidenciaron los gastos asociados al consumo de GLP y otro donde se proyectaron los costos asociados a la implementación del biodigestor tubular, lo que finalmente permitió evaluar la viabilidad para la implementación del biodigestor tubular en función de la relación costo-beneficio.</p> | | | |

Palabras clave

Biodigestor, biodigestor tubular, biogás, digestión anaerobia, estiércol de porcino.

Planteamiento del problema

La limitada cobertura en los servicios públicos de gas natural y GLP en zonas rurales de Colombia hacen que el 12% de los colombianos se vean obligados a cocinar con leña generando un impacto en salud pública y ambiental, según lo indica Alejandro Martínez, presidente de la Asociación Colombiana de GLP (Gasnova) en entrevista con revista Portafolio en el año 2021.

De igual forma, según informe del censo poblacional del Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE en 2018 solo el 69% de la población cuenta con el servicio de red domiciliaria de gas por tanto queda un porcentaje que no accede a este servicio y se ve obligado a la compra de cilindros de GLP o hacer uso de cocinas eléctricas, lo cual ocasiona un costo representativo para sus bolsillos.

Por estas razones y debido a la complejidad geológica de la Vereda Pescadito del municipio de Cepitá-Santander, con terrenos irregulares e inestables, zonas erosionadas por surcos y cárcavas, ha causado limitaciones en el proyecto de instalar una red de gas domiciliario, formulado por una empresa de servicios de distribución de gas, ya que impide realizar el trazado y la instalación de las redes domiciliarias de gas desde la estación de GLP hasta los diferentes puntos de distribución, imposibilitando que los usuarios tengan acceso al servicio de gas.

Asimismo, al no contar con este servicio por red domiciliaria las personas de la vereda se ven obligadas a pagar altos costos representativos por la compra de cilindros de GLP, uso de cocinas eléctricas o en su defecto cocinar con leña, lo cual genera un impacto a la salud pública y al medio ambiente.

Pregunta

¿Cuál es la viabilidad técnica y financiera de implementar un biodigestor tubular en la finca El Líbano, municipio de Cepitá, Santander?

Objetivos

Objetivo General

Determinar la viabilidad técnico - financiera de la implementación de un biodigestor tubular en la finca el Líbano, Cepitá – Santander.

Objetivos Específicos

- Identificar casos de estudio sobre el uso de biodigestores tubulares aprovechando el estiércol de porcino para la generación de biogás en diferentes fincas del país.
- Determinar los requisitos técnicos y operativos para la implementación de biodigestores tubulares según el caso de estudio a analizar.
- Definir la viabilidad financiera para la implementación de un biodigestor tubular en la finca el Líbano, Cepitá-Santander.

Marco teórico

Biodigestor es el instrumento a través del cual se lleva a cabo la digestión anaerobia y por ende la producción de biogás y fertilizante a partir de materia orgánica. Su funcionamiento se basa en introducir el sustrato al biodigestor, el cuál es metabolizado por un consorcio bacteriano en ausencia de oxígeno y bajo ciertos parámetros, y como resultado se obtiene biogás y un subproducto líquido usado como fertilizante. (Martí, 2019)

En el mercado se pueden encontrar diversos tipos de biodigestores, su clasificación dependerá de factores como la forma de operación (entrada y descarga), el volumen, el número de tanques de proceso y su orientación o los sistemas de movilización de biomasa. (Martí, 2008) *Ver página 16*

El tipo de gas que se produce del resultado de la digestión anaerobia en la cual se descompone la materia orgánica sin presencia de oxígeno, es conocido como Biogás. Su composición básicamente es: metano (CH₄) con porcentajes que oscilan entre 50% y

70%, dióxido de carbono (CO₂) con porcentajes entre 40% y 20%, y otros gases con una concentración muy inferior, como nitrógeno(N₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S) y vapor de agua (H₂O), estos últimos son considerados impurezas que reducen la calidad del biogás, en la tabla 1 se refleja la concentración de cada componente del biogás. (Martí, 2019) (Porkcolombia., 2020) *Ver página 24*

La **digestión anaerobia** (DA) es considerada como una alternativa para reemplazar la biomasa tradicional, además de cumplir con los requerimientos en calor, iluminación y electricidad, mejora la productividad de las fincas, asimismo, disminuye el impacto al medio ambiente causado por las emisiones de gases de efecto invernadero y elimina el uso de los combustibles fósiles y agroquímicos. (Sharma, 2016 citado por (Parra Ortiz, 2019)) *Ver página 25*

Método

El presente proyecto de investigación busca determinar la viabilidad técnico-financiera para implementar un biodigestor tubular que permita el aprovechamiento del estiércol porcino para la generación de biogás en la finca El Líbano, Cepitá (Santander).

Inicialmente, se plantea realizar una investigación acerca de casos de estudio donde se tengan experiencias exitosas respecto al funcionamiento de biodigestores tubulares en Colombia alimentados con estiércol de porcino, logrando obtener información que permita ser un referente y mediante las lecciones aprendidas se logre contextualizar en el caso de estudio.

Una vez identificados los casos de estudio, realizar el análisis técnico determinando los parámetros mínimos requeridos, identificando las características geográficas, requerimientos y especificaciones técnicas necesarias para la implementación del biodigestor en la finca el Líbano.

Seguidamente establecer los costos asociados al biodigestor tubular a implementar en la finca El Líbano y realizar un análisis financiero comparativo de dos escenarios, uno donde se evidencie los gastos asociados al consumo de GLP (escenario actual) y otro donde se proyecte los costos asociados a la implementación del biodigestor tubular.

Ver información completa en la página 32.

Resultados, hallazgos u obra realizada

Se realizó la consulta bibliográfica en diferentes bases de datos a través de los recursos electrónicos disponibles por la biblioteca de la Corporación Universitaria UNITEC, catálogo bibliográfico electrónico de la Universidad Industrial de Santander, Google Académico y publicaciones de la Red de Biodigestores para Latinoamérica y el Caribe (RedBiolac) haciendo uso de palabras claves como: Biogás, Digestión Anaerobia, Biogás a partir de estiércol de Porcino, Biodigestores en Colombia entre otros.

Posteriormente, se depuró la información según la temática y el área específica a investigar en función de los objetivos propuestos para la realización del proyecto, analizando las fuentes y referencias bibliográficas las cuales soportan los casos de estudio relacionados y están acorde a la justificación del proyecto y criterios de búsqueda.

Se relacionaron algunos de los casos de estudio documentados y soportados técnicamente, sobre experiencias llevadas a cabo en diferentes zonas rurales del país, las cuales desarrollaron procesos a través del uso e implementación de biodigestores para la obtención de biogás. *Ver página 34*

Seguidamente, se realizó un análisis técnico con base en la guía de diseño y manual de instalación de biodigestores tubulares escrito por el doctor Jaime Martí Herrero, experto mundial quien lideró y coordinó el proyecto de biogás de la cooperación técnica alemana logrando la instalación de 750 biodigestores adaptados en clima frío en Ecuador y quien actualmente participa en el desarrollo de programas nacionales de biogás en países latinoamericanos (Biodigestores, 2020).

Los parámetros relacionados para el análisis técnico son de tipo geográfico, técnicos y operativos según el caso de estudio. Estos parámetros son los mínimos requeridos para determinar la viabilidad de implementar un biodigestor de tipo tubular. *Ver página 33*

Finalmente, se determinó la viabilidad financiera de implementar un biodigestor tubular realizando un análisis financiero comparativo de dos escenarios, uno donde se evidencia

los gastos asociados al consumo de GLP (escenario actual) y otro donde se proyectan los costos asociados a la implementación del biodigestor tubular. *Ver página 37*

Conclusiones

Es factible técnica y financieramente implementar un biodigestor tubular para el aprovechamiento del estiércol de porcino en la generación de biogás en la finca el Líbano, municipio de Cepitá, Santander. *Ver información completa en la página 48.*

Productos derivados

N/A

**Estudio de Viabilidad Técnico - Financiera de la Implementación de un Biodigestor
Tubular en la Finca El Líbano, Cepitá – Santander**

Laura Lisseth Monsalve Herrera
Cod. 10223035

Omar Fernando Quiñonez Bolívar
Cod. 10223032

Corporación Universitaria UNITEC
Escuela de Ingeniería
Especialización en Gerencia de Proyectos

Bogotá, Distrito Capital
24 de abril de 2023

**Estudio de Viabilidad Técnico - Financiera de la Implementación de un Biodigestor
Tubular en la Finca El Líbano, Cepitá – Santander**

Laura Lisseth Monsalve Herrera
Cod. 10223035

Omar Fernando Quiñonez Bolívar
Cod. 10223032

Juan Carlos Guzmán Gómez
Docente

Corporación Universitaria UNITEC
Escuela de Ingeniería
Especialización en Gerencia de Proyectos

Bogotá, Distrito Capital
24 de abril de 2023

Tabla de Contenido

| | |
|--|----|
| Objetivo General | 3 |
| Objetivos Específicos | 3 |
| Resumen..... | 12 |
| Palabras clave..... | 12 |
| Problema de Investigación | 12 |
| Justificación | 14 |
| Pregunta de Investigación | 15 |
| Objetivos | 16 |
| Objetivo General | 16 |
| Objetivos Específicos | 16 |
| Marco Teórico..... | 16 |
| 1. Biodigestores | 16 |
| 1.1. Biodigestor Tipo Chino o de Cúpula Fija | 17 |
| 1.2. Biodigestor Tipo Hindú o de Campana Flotante..... | 18 |
| 1.3. Biodigestor Tipo Taiwán o de Flujo Continuo..... | 19 |
| 1.3.1. Ventajas..... | 21 |
| 1.3.2. Desventajas | 22 |
| 1.4. Investigaciones en Biodigestores | 23 |
| 2. Biogás | 24 |
| 3. Digestión Anaerobia | 25 |
| 3.1. Factores que afectan la Digestión Anaerobia..... | 27 |
| 3.1.1. Tipos de Materia Orgánica..... | 27 |
| 3.1.2. Contenido de Agua, Sólidos Totales, Sólidos Volátiles | 29 |
| 3.1.3. pH..... | 30 |
| 3.1.4. Tóxicos e Inhibidores..... | 30 |
| 3.1.5. Temperatura..... | 31 |
| 3.1.6. Tiempo de Retención..... | 31 |
| Metodología | 32 |
| Resultados o hallazgos | 34 |

| | |
|-----------------------|----|
| Objetivo 1 | 34 |
| Objetivo 2 | 38 |
| Objetivo 3 | 41 |
| Conclusiones | 48 |
| Recomendaciones | 49 |
| Referencias | 50 |
| Anexo 1 | 54 |



Lista de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Componentes del Biogás. | 24 |
| Tabla 2 Tipos de materia orgánica..... | 28 |
| Tabla 3 Composición química de materia prima de origen animal. | 29 |
| Tabla 4 Relación estiércol-agua para la generación de Biogás..... | 30 |
| Tabla 5 Relación entre temperatura y tiempo de retención. | 32 |
| Tabla 6 Metodología..... | 33 |
| Tabla 7 Producción de biogás según la temperatura y tiempo de retención..... | 40 |
| Tabla 8 Costos de Materiales, Recursos e Insumos..... | 42 |
| Tabla 9 Precio Cilindros de GLP..... | 43 |
| Tabla 10 Consumo Promedio de GLP..... | 44 |
| Tabla 11 Costo Mensual de GLP..... | 44 |
| Tabla 12 Costo Anual de GLP..... | 45 |
| Tabla 13 Costo Anual del Biodigestor..... | 46 |
| Tabla 14 Costo Anual del Biodigestor vs GLP..... | 46 |

Lista de Ilustraciones

| | |
|--|----|
| Ilustración 1. Causas y efectos..... | 13 |
| Ilustración 2 ¿Cómo funciona un biodigestor?..... | 16 |
| Ilustración 3 Biodigestor de cúpula fija..... | 17 |
| Ilustración 4 Biodigestor de campana flotante..... | 18 |
| Ilustración 5 Biodigestor Tipo Taiwán o Tubular..... | 20 |
| Ilustración 6 Partes del Biodigestor Tubular..... | 21 |
| Ilustración 7 Proceso de Digestión Anaerobia..... | 26 |
| Ilustración 8 Localización Finca El Líbano, Cepitá - Santander. | 39 |
| Ilustración 9 Matriz de Requisitos y cumplimiento..... | 41 |

Resumen

El presente proyecto de investigación busca ser una alternativa para la generación de gas a partir del estiércol de porcino por medio de la implementación de un biodigestor, siendo esta una solución que contribuye con la sostenibilidad económica, ambiental y social para las comunidades que habitan en zonas veredales que no cuentan con el servicio público del gas.

Inicialmente, se realizó una investigación acerca de casos de estudio donde se tuvieron experiencias exitosas respecto al funcionamiento de biodigestores tubulares en Colombia alimentados con estiércol de porcino, logrando obtener información que permitió ser un referente y mediante las lecciones aprendidas se logró contextualizar en el caso de estudio.

Una vez se identificaron los casos de estudio, se realizó el análisis técnico determinando los parámetros mínimos requeridos, identificando las características geográficas, requerimientos y especificaciones técnicas necesarias para la implementación del biodigestor en la finca el Líbano.

Seguidamente, se establecieron los costos asociados al biodigestor tubular y se realizó un análisis financiero comparativo de dos escenarios, uno donde se evidenciaron los gastos asociados al consumo de GLP y otro donde se proyectaron los costos asociados a la implementación del biodigestor tubular, lo que finalmente permitió evaluar la viabilidad para la implementación del biodigestor tubular en función de la relación costo-beneficio.

Palabras clave

Biodigestor, biodigestor tubular, biogás, digestión anaerobia, estiércol de porcino.

Problema de Investigación

La limitada cobertura en los servicios públicos de gas natural y GLP en zonas rurales de Colombia hacen que el 12% de los colombianos se vean obligados a cocinar con leña generando un impacto en salud pública y ambiental, según lo indica Alejandro Martínez, presidente de la Asociación Colombiana de GLP (Gasnova) en entrevista con revista Portafolio en el año 2021.

De igual forma, según informe del censo poblacional del Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE en 2018 solo el 69% de la población cuenta con el servicio de red domiciliaria de gas por tanto queda un porcentaje que no accede a este servicio y se ve obligado a la compra de cilindros de GLP o hacer uso de cocinas eléctricas, lo cual ocasiona un costo representativo para sus bolsillos.

Adicionalmente, según la polémica decisión del actual gobierno de no conceder nuevos contratos de exploración de petróleo y gas, anuncio realizado por la ministra de minas y energía durante su participación en el foro económico mundial de Davos, surge la necesidad y la obligación de buscar opciones de generar energías limpias sin depender de combustibles fósiles.

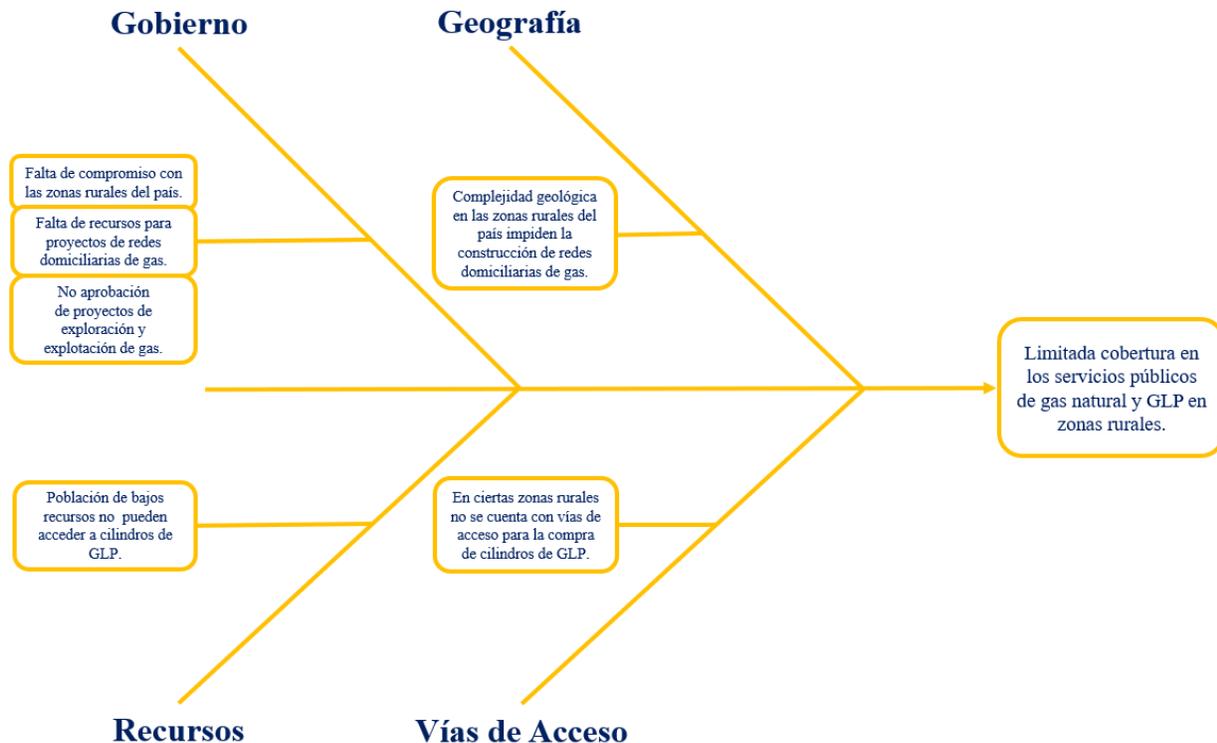
Por estas razones y debido a la complejidad geológica de la Vereda Pescadito del municipio de Cepitá-Santander, con terrenos irregulares e inestables, zonas erosionadas por surcos y cárcavas, ha causado limitaciones en el proyecto de instalar una red de gas domiciliario, formulado por una empresa de servicios de distribución de gas, ya que impide realizar el trazado y la instalación de las redes domiciliarias de gas desde la estación de GLP hasta los diferentes puntos de distribución, imposibilitando que los usuarios tengan acceso al servicio de gas.

Asimismo, al no tener el servicio de gas por red domiciliaria las personas de la vereda se ven obligadas a pagar altos costos representativos por la compra de cilindros de GLP, uso de cocinas eléctricas o en su defecto cocinar con leña, lo cual genera un impacto a la salud pública y al medio ambiente.

En la ilustración 1 se aprecia un diagrama de causas y efectos, donde se identifican las causas del problema planteado.

Ilustración 1. *Causas y efectos*





Justificación

Dada la limitación en las zonas rurales del país al acceso de servicio de gas por red domiciliaria, surge la necesidad de encontrar una alternativa que sea económicamente factible, operativamente viable y ambientalmente sostenible para mejorar la calidad de vida de las familias colombianas que viven en estas zonas de difícil acceso y que no cuentan con el recurso de gas.

Así, surge una solución la cual beneficia especialmente al campesino aprovechando tanto el biogás como alternativa del uso de leña que aparte de ser perjudicial para la salud de las personas lo es también para el medio ambiente (Ferrer, 2009), asimismo como la biomasa la cual puede ser aprovechada para la formulación y transformación de abonos orgánicos y fertilizantes libres de químicos que permiten tener un aumento en el rendimiento de los cultivos. (Garfí M. G., 2011)

Según lo expresado por PorkColombia en su guía de biogás para el sector porcícola en Colombia (2020), se destaca que la conversión de los residuos de biomasa porcícola en biogás capturado desempeña un papel fundamental en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), estas emisiones excesivas contribuyen al aceleramiento del calentamiento global. Además, este proceso proporciona beneficios adicionales al productor, como ahorros en la tarifa de electricidad y la disponibilidad de energía térmica para llevar a cabo sus procesos.

Considerando la disponibilidad de porcínaza y otros residuos generados por la actividad porcícola en varias regiones de Colombia, así como su alto poder calorífico (según la UPME, en 2017 se estimó una producción anual de 2.747.400 toneladas de biomasa residual porcícola, con un potencial técnico factible de 2.120 Terajoules por año), el país cuenta con una excelente oportunidad para aprovechar y generar biogás a pequeña y mediana escala, beneficiando a numerosos actores involucrados.

De igual forma, se pueden seguir enumerando los beneficios del uso de biodigestores como lo expone (Cepero et al, 2012), los biodigestores permiten reducir la emisión descontrolada de metano y CO₂ en la atmósfera, ambos gases de efecto invernadero, la emisión de óxido nítrico y amoníaco por medio de la aplicación como bioabono de los efluentes del biodigestor, y los contaminantes orgánicos presentes en los estiércoles, al ser descompuestos en la digestión anaerobia.

Por lo tanto, se plantea este proyecto de análisis técnico-financiero para determinar la viabilidad de implementación de un biodigestor tubular para el aprovechamiento del estiércol de porcino para la generación de biogás en la finca El Líbano, municipio de Cepitá, departamento de Santander.

Pregunta de Investigación

¿Cuál es la viabilidad técnica y financiera de implementar un biodigestor tubular en la finca El Líbano, municipio de Cepitá, Santander?

Objetivos

Objetivo General

Determinar la viabilidad técnico - financiera de la implementación de un biodigestor tubular en la finca el Líbano, Cepitá – Santander.

Objetivos Específicos

- Identificar casos de estudio sobre el uso de biodigestores tubulares aprovechando el estiércol de porcino para la generación de biogás en diferentes fincas del país.
- Determinar los requisitos técnicos y operativos para la implementación de biodigestores tubulares según el caso de estudio a analizar.
- Definir la viabilidad financiera para la implementación de un biodigestor tubular en la finca el Líbano, Cepitá-Santander.

Marco Teórico

1. Biodigestores

Biodigestor es el instrumento a través del cual se lleva a cabo la digestión anaerobia y por ende la producción de biogás y fertilizante a partir de materia orgánica. Su funcionamiento se basa en introducir el sustrato al biodigestor, el cuál es metabolizado por un consorcio bacteriano en ausencia de oxígeno y bajo ciertos parámetros, y como resultado se obtiene biogás y un subproducto líquido usado como fertilizante, como se explica en la ilustración 2. (Martí, 2019)

Ilustración 2 *¿Cómo funciona un biodigestor?*





Tomado de (Ecocontenedores, 2022)

En el mercado se pueden encontrar diversos tipos de biodigestores, su clasificación dependerá de factores como la forma de operación (entrada y descarga), el volumen, el número de tanques de proceso y su orientación o los sistemas de movilización de biomasa. (Martí, 2008)

Los tipos de biodigestores más comunes son tipo chino o cúpula fija, tipo hindú o campana flotante y Taiwán o tubular. Para el presente proyecto se profundizará en este último tipo de biodigestor.

1.1. Biodigestor Tipo Chino o de Cúpula Fija

Ilustración 3 *Biodigestor de cúpula fija*



Tomado de (FAO, 2019)

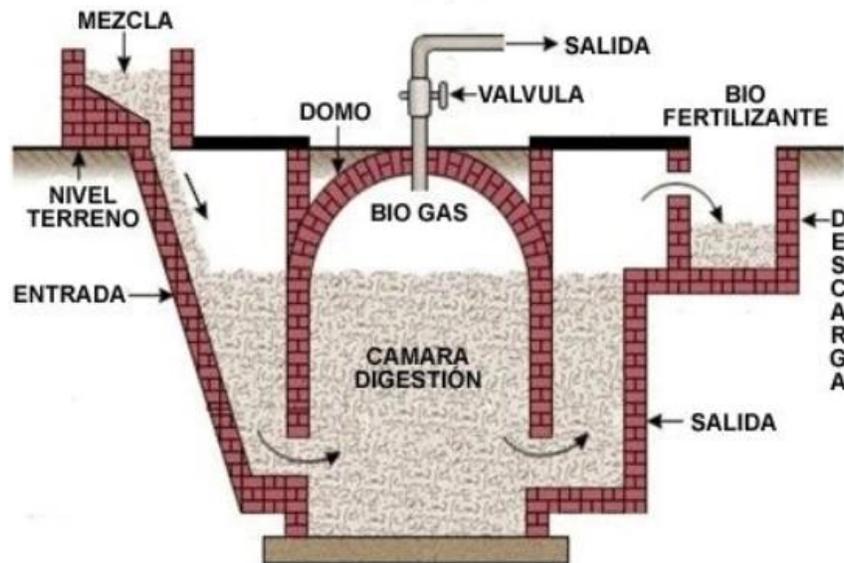
Según el manual de biogás (2011), el biodigestor de cúpula fija está formado por una cámara de digestión con techo en forma de domo, y dos tanques conectados a la cámara, uno en la entrada, o dónde se surte el biodigestor con la mezcla del sustrato y agua, y otro, en la salida del biol o efluente usado como fertilizante. En el interior de la cámara de digestión anaerobia el biogás se almacena en la parte superior, y fluye a través de un conducto que se conecta con una válvula de seguridad, y llega hasta el lugar donde será consumido el biogás (ver ilustración 3).

Este modelo se entierra completamente, lo que le permite ser altamente eficiente en el tratamiento de aguas y la producción de bio-abono más que en la producción de biogás. El biodigestor tipo chino necesita entre 30 y 60 días para completar el proceso de digestión. (FAO., 2011)

1.2. Biodigestor Tipo Hindú o de Campana Flotante

Ilustración 4 Biodigestor de campana flotante





Tomado de (Torre Guillén D., 2009)

Este modelo de biodigestor se encuentra semienterrado, y está formado por un tanque vertical y una campana flotante o gasómetro, en la mayoría de los casos metálica, para almacenar el biogás y generar presión constante, lo cual es favorable al momento de emplear los equipos y sistemas que trabajan con este biogás. Asimismo, cuenta con un depósito de premezcla para surtir el biodigestor, y un depósito de salida para descargar el fertilizante (ver ilustración 4). Este modelo es más eficiente para la producción de biogás que el tipo chino. (Porkcolombia., 2020)

1.3. Biodigestor Tipo Taiwán o de Flujo Continuo

El biodigestor tubular plástico, ilustrado en la figura 5, se compone de una bolsa alargada hecha de polietileno. Su relación de longitud a ancho generalmente es de aproximadamente 5:1, aunque las dimensiones pueden variar por razones de construcción eficiente (Frederiks, 2011)., esta bolsa se instala en una cavidad específica. Este tipo de biodigestor tiene un costo muy inferior al de cúpula fija, sin embargo, tiene un menor tiempo de vida útil (menos de un 25% de la vida del biodigestor de cúpula fija). (Cepero et al, 2012) Según Garfí, el costo de capital es un 12% menor para el digestor tubular de plástico respecto al digestor de cúpula fija. (Garfí M. C., 2014)

Ilustración 5 *Biodigestor Tipo Taiwán o Tubular*



Tomado de (Martí, 2019) y (FAO, 2019)

Según los datos proporcionados por PorkColombia (2020), el biodigestor tubular de flujo continuo, también conocido como tipo Taiwán, se destaca como el sistema más económico entre los tres modelos analizados. Este tipo de biodigestor se fabrica con materiales como plástico o geotextil, lo que reduce la necesidad de mano de obra y la compra de materiales adicionales como cemento, ladrillos, varillas y otros elementos de construcción que incrementan los costos de implementación.

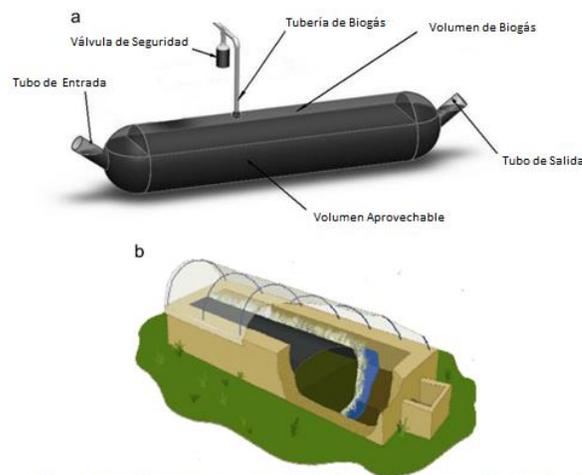
Este modelo de biodigestor se encuentra semienterrado, sin embargo, la zanja es menos profunda respecto a los otros modelos, razón por la cual no requiere de sistemas de contención. (Martí, 2019)

Este tipo de biodigestor utiliza la radiación solar para aumentar la temperatura en el interior de la cámara de digestión, y así mantener el sistema a temperatura óptima para que el proceso sea más eficiente, reduciendo los tiempos de retención (TRH). Asimismo, los biodigestores tubulares son adaptables en climas fríos y gracias a esta característica estos sistemas son los más utilizados en Latinoamérica y en Colombia. (Martí, 2019) Acorde a la ilustración 6 se relaciona el biodigestor tubular con sus diferentes partes (a): Tubo de entrada, cámara de digestión la cual consta de un volumen aprovechable o volumen de líquidos y el volumen de Biogás el cual será ocupado una vez este se libere, tubería de biogás la cual hace

parte de la red de conducción para su fácil canalización y aprovechamiento, válvula de seguridad como regulador de presión al interior del sistema y tubo de salida.

Además, existen diferentes diseños o adaptaciones con base en el modelo de biodigestor tubular (b), esto es posible realizarlo según la disponibilidad de recursos, materiales y presupuesto de quien lo requiera implementar, desde estructuras de concreto para refuerzo, techos o cubiertas de cúpula que conservan y protegen de la intemperie, entre otros.

Ilustración 6 *Partes del Biodigestor Tubular*



Modelo de Biodigestor Tubular: (a) Esquema del sistema; (b) adaptación a Andrea Platau (cubierta de cúpula) cortesía de blanca corona de Ingeniería sin Fronteras Zaragoza

Modificado y Tomado de (Garfí M. M.-H., 2016)

Existen ventajas y desventajas asociadas a los biodigestores tipo tubular, entre las más importantes se encuentran las siguientes:

1.3.1. Ventajas

Según la guía de diseño y manual de instalación de biodigestores tubulares, se tienen las siguientes ventajas en este tipo de biodigestor, (Martí, 2019):

- Es el sistema más conocido en América Latina.
- Se adapta a clima frío con calefacción solar pasiva
- Se instala rápido, uno o dos días después de cavar la zanja
- Un granjero capacitado puede instalar biodigestores tipo Taiwán
- Los costos de transporte de materiales son bajos

- El tipo de material de la cámara de digestión puede ser tanto de plástico como geomembrana.
- Plásticos:
 - La relación entre el costo y la durabilidad (de 5 a 7 años) es apropiada para los pequeños productores agropecuarios.
 - Materiales son fáciles de adquirir en ferreterías
- Geomembrana:
 - Se consiguen prefabricados
 - Variedad de tamaños
 - Vida útil aproximadamente de 15 años
 - Geomembrana de PVC: muy fáciles de reparar
 - Geomembrana de polietileno: altamente resistentes

1.3.2. Desventajas

Como desventajas se tienen según (Martí, 2019):

- Se debe proteger y acordonar el área debido a que no está 100% enterrado y la cúpula queda a la vista.
- Mayor requerimiento de agua en la carga respecto a los biodigestores de domo fijo (estiércol: agua, 1:3 a 1:5)
- Se alcanzan menores presiones de biogás en comparación con los biodigestores de domo fijo (hasta 15cm de columna de agua).
- En general, es común utilizar reservorios externos de biogás con el fin de aumentar la presión y almacenar el biogás de manera más efectiva.
- Plásticos:
 - No se tiene variedad en tamaños de plásticos en el mercado.
 - Se puede reparar hasta agujeros de 20cm.
- Geomembrana:
 - Costes similares a domo fijo adaptado
 - Geomembrana PVC: Si el biodigestor no es reforzado, las presiones de biogás alcanzarían aproximadamente 5 cm de columna de agua.
 - Geomembrana polietileno: reparables hasta agujero de 20cm

La importancia y aplicabilidad de los biodigestores en distintos países latinoamericanos y del caribe se encuentran documentadas en diferentes investigaciones avaladas por la Red Biolac, a continuación, se relaciona dicha importancia.

1.4. Investigaciones en Biodigestores

Según la memoria anual 2020 publicada por la Red de Biodigestores Red Biolac para Latinoamérica y el Caribe, existen personas e instituciones que trabajan e investigan articuladamente sobre biodigestores y temas afines, y se unen a la Red con el objetivo de contribuir a las actividades de intercambio de conocimientos como cursos, talleres, pasantías, artículos científicos, entre otros, con el fin de fortalecer los vínculos de ambas partes y la difusión de la Red.

Existen 35 entidades e instituciones vinculadas a la Red Biolac asociados a 13 países tales como Argentina, Brasil, Chile, Ecuador, Perú, Paraguay, Uruguay, Colombia, México, Costa Rica, Honduras, El Salvador y Cuba.

La Red Biolac en Colombia está conformada por las siguientes entidades e instituciones: Red Colombiana de Energía de la Biomasa (Red Biocol), Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria – CIPAV, Fundación para Producción Agropecuaria Tropical Sostenible, Colegio Mayor de Antioquia, Universidad Industrial de Santander y Universidad El Bosque.

El producto obtenido de la síntesis y transformación bioquímica experimental dentro del biodigestor se denomina biogás, así mismo, conocida como la fuente de energía renovable y la alternativa más respetuosa con el medio ambiente (Climate Consulting, 2022)

2. Biogás

El tipo de gas que se produce del resultado de la digestión anaerobia en la cual se descompone la materia orgánica sin presencia de oxígeno, es conocido como Biogás. Su composición básicamente es: metano (CH₄) con porcentajes que oscilan entre 50% y 70%, dióxido de carbono (CO₂) con porcentajes entre 40% y 20%, y otros gases con una concentración muy inferior, como nitrógeno(N₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S) y vapor de agua (H₂O), estos últimos son considerados impurezas que reducen la calidad del biogás, en la tabla 1 se refleja la concentración de cada componente del biogás. (Martí, 2019) (Porkcolombia., 2020)

Tabla 1. *Componentes del Biogás.*

| Constituyente | Concentración |
|---|----------------------|
| Metano (CH ₄) | 50-75 Vol. % |
| Dióxido de Carbono (CO ₂) | 25-45 Vol. % |
| Agua (H ₂ O) | 2-7 Vol. % (20-40°C) |
| Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S) | 20-20.000 ppm |
| Nitrógeno (N ₂) | <2 Vol. % |
| Oxígeno (O ₂) | < 2 Vol. % |
| Hidrogeno (H ₂) | < 1 Vol. % |

Nota: Tomado de (Porkcolombia., 2020)

Este tipo de biocombustible puede ser usado en diversas actividades, sin embargo, entre las más comunes se encuentra la generación de electricidad, obtención de energía térmica (calor) para la cocción de alimentos, uso en calderas, iluminación, incluso como combustible para vehículos y si es de buena calidad puede ser usado en redes de gas natural. (FAO., 2011) (Martí, 2019).

Asimismo, un aspecto importante a resaltar del biogás es su poder calorífico el cuál es menor al de los gases fósiles, lo que se traduce en un mayor consumo y tiempo en las actividades, por ejemplo, cuando se cocina con biogás y no con gas natural o gas licuado de

petróleo GLP, aun así, para las áreas dónde no se cuenta con el servicio de redes domiciliarias de gas natural este biocombustible es una excelente opción para mejorar la calidad de las personas. (FAO., 2011)

Entre los beneficios que se resaltan del uso del biogás se encuentran la mitigación alrededor de un 85% en la emisión de gases de efecto invernadero, la conservación del medio ambiente al disminuir la deforestación, el mejoramiento de la salud de las familias al reducir el consumo de leña, la higiene animal al eliminar olores y focos de infección y ahorro en los costos de gas natural y GLP. (RedBiolac., 2022) (Parra Ortiz, 2019)

Además, el biogás es una fuente de energía renovable, al ser aprovechable el estiércol del animal mediante la transformación química experimentada durante el proceso de digestión anaerobia logrando transformar lo considerado residual o desechable en un activo importante tanto para las familias que se beneficiarían del proyecto como el ecosistema circundante, esto gracias a la minimización del uso de combustibles fósiles y emisiones de gases efecto invernadero.

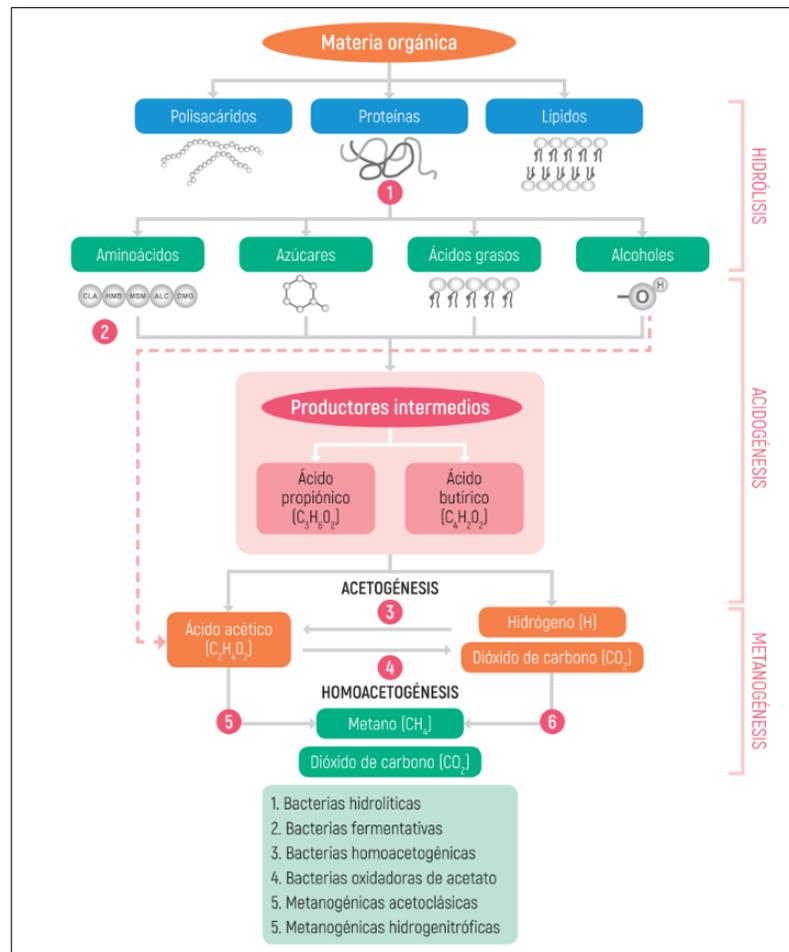
A continuación, se analiza detalladamente el proceso de digestión anaerobia llevado a cabo al interior de los biodigestores y el cual permite la producción de biogás.

3. Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia (DA) es considerada como una alternativa para reemplazar la biomasa tradicional, además de cumplir con los requerimientos en calor, iluminación y electricidad, mejora la productividad de las fincas, asimismo, disminuye el impacto al medio ambiente causado por las emisiones de gases de efecto invernadero y elimina el uso de los combustibles fósiles y agroquímicos. (Sharma, 2016 citado por (Parra Ortiz, 2019))

Según las definiciones presentadas por Martí (2019) en la Guía de Diseño y Manual de Instalación de Biodigestores Tubulares, la digestión anaerobia se refiere a un proceso biológico que permite la descomposición de la materia orgánica. Una característica distintiva de este proceso es la producción de biogás, a diferencia de otros métodos como el compostaje o la lombricultura. Este tipo de digestión se lleva a cabo en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis como se evidencia en la ilustración 7.

Ilustración 7 *Proceso de Digestión Anaerobia*



Nota: Tomado de (Porkcolombia., 2020).

La primera etapa del proceso es la hidrólisis, en esta la materia orgánica se descompone pasando de proteínas, carbohidratos y lípidos, a compuestos más pequeños y sencillos como aminoácidos, azúcares y ácidos grasos. En la segunda etapa del proceso o acidogénesis los compuestos solubles obtenidos de la hidrólisis son transformados a dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2), y a otros ácidos de cadena corta (ácidos grasos volátiles). En la tercera etapa o acetogénesis estos ácidos de cadena corta, son convertidos en ácido acético. Finalmente, en la última etapa del proceso o metanogénesis, las bacterias metanógenas convierten el ácido acético en metano (CH_4), hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2). (FAO., 2011) (Martí, 2019) Corrales, 2015 citado por (Porkcolombia., 2020).

Cada una de las fases de la digestión anaerobia es desarrollada por una gran cantidad de tipos de bacterias las cuales forman el llamado consorcio bacteriano. En este consorcio, las bacterias actúan de forma distinta dependiendo del tipo de biodigestor y las condiciones de operación como la temperatura, el pH, el nivel de humedad y la materia orgánica que alimenta el biodigestor. (Martí, 2019)

Los principales beneficios del método de la digestión anaerobia es que es un proceso funcional ampliamente usado en industrias cerveceras, procesadoras de alimentos, plantas de sacrificio animal y disposición de residuos sólidos, puede disminuir hasta un noventa y cinco por ciento la carga orgánica presente en los afluentes residuales de la industria agroalimentaria. Los residuos vertidos a ríos y lagos causarían una menor contaminación en comparación con aquellos que no han sido tratados. (Universidad de Guadalajara, 2010)

A continuación, se describen los factores que influyen considerablemente en el proceso de digestión anaerobia.

3.1. Factores que afectan la Digestión Anaerobia

Según Sarapatka, los factores que afectan la digestión anaerobia se pueden clasificar en tres grupos: (i) factores independientes como las condiciones naturales; (ii) factores afectados por las condiciones de operación como la composición del alimento o la etapa aeróbica; y (iii) factores secundarios que tal vez no influyen en la digestión en condiciones operativas óptimas como la calidad del alimento, cantidad y calidad de las camas, tecnología de remoción de estiércol de corral, entre otras. (Sarapatka, 1994)

3.1.1. Tipos de Materia Orgánica

Existen diversos tipos de materia orgánica que puede ser utilizada para la obtención del biogás, entre estos se encuentran los residuos orgánicos de origen animal, vegetal, forestal, agroindustrial y doméstico, en la tabla 2 se puede visualizar ejemplos de cada tipo. (FAO., 2011)

Tabla 2 *Tipos de materia orgánica.*

| | Tipo de residuo |
|---------------------------------------|--|
| Origen animal | Estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescados |
| Origen vegetal | Malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado |
| Origen humano | Heces, basura, orina |
| Agroindustriales | Salvado de arroz, orujos, cosetas, melazas, residuos de semillas |
| Residuos forestales | Hojas, vástagos, ramas y cortezas |
| Residuos de cultivos acuáticos | Algas marinas, jacintos y malezas acuáticas |

Fuente: Adaptado de (FAO., 2011)

Según el Manual del Biogás (2011), es importante resaltar que depende del tipo de materia orgánica o sustrato que se utilice en el proceso de biodigestión será la cantidad de metano producido y la calidad del biogás obtenido. Asimismo, la composición química de la materia orgánica que se utilice en el proceso influye ya sea de manera positiva (simplificando y agilizando) o negativa (obstaculizando y retardando) el trabajo del consorcio bacteriano.

Es decir, compuestos como grasas, proteínas y azúcares permiten el proceso de degradación a su vez que originan carbono y nitrógeno mientras que las moléculas como la lignina y la celulosa son complejas y difíciles de romper por lo que requieren tratamientos para ser metabolizadas por el consorcio bacteriano. En la tabla 3, se puede observar la composición química de varias materias primas de origen animal, en la cual está enfocado el presente trabajo. (FAO., 2011) (Porkcolombia., 2020)

Otro factor que permite la buena digestión anaerobia y depende del tipo de sustrato empleado es la relación carbono nitrógeno (C/N), la cual es más favorable si es de treinta (30) unidades de carbono por una (1) de nitrógeno (30:1). Aunque este factor no permite saber si el carbono está disponible o no para las bacterias. (Martí, 2019)

Tabla 3 *Composición química de materia prima de origen animal.*

| Materia Prima | % Lípidos | %Proteínas | %Celulosa-hemicelulosa | %Lignina | %Ceniza |
|----------------------|------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------|----------------|
| Bovino | 3,23 | 9,05 | 32,49 | 35,57 | 19,66 |
| Porcino | 11,50 | 10,95 | 32,39 | 21,49 | 23,67 |
| Aves | 2,84 | 9,56 | 50,55 | 19,82 | 17,23 |
| Equino | 2,70 | 5,00 | 40,50 | 35,00 | 17,80 |
| Ovino | 6,30 | 3,75 | 32,00 | 32,00 | 25,95 |

Nota: Tomado de (Porkcolombia., 2020)

3.1.2. Contenido de Agua, Sólidos Totales, Sólidos Volátiles

Los Sólidos Totales (ST) es un parámetro que estima el porcentaje de materia seca presente en el sustrato después de retirar el agua contenida en esta por medio de la evaporación. A su vez, estos Sólidos Totales están comprendidos por sólidos inertes y orgánicos, estos últimos serían el alimento de las bacterias para el proceso de digestión anaerobia. (Martí, 2019).

De igual forma, el contenido de agua presente en el biodigestor es fundamental para que las bacterias realicen el proceso completo de digestión anaerobia y puedan sobrevivir, crecer, movilizarse y realizar todas sus funciones biológicas. Las bacterias metanogénicas son altamente afectadas por el contenido de sólidos en la materia orgánica, por esta razón, es primordial manejar un porcentaje apto de sólidos totales en la mezcla que ingresa al biodigestor. Así, a mayor porcentaje de sólidos totales (%ST) presente en el sustrato, mayor la cantidad de agua requerida para la dilución. En la tabla 4, se aprecia una referencia de la relación estiércol-agua usada en la generación de biogás. (FAO., 2011)

Según Martí (2019) se recomienda instalar un medidor de caudal para facilitar el control del contenido de materia seca, la cantidad de agua que se requiere, y los sólidos totales que entran al reactor. Lo que puedo medir lo puedo controlar, es decir si cuantifico la cantidad de estiércol que ingresa al sistema junto con el agua que requiero en proporción puedo determinar la mezcla requerida y reformular o ajustar si es necesario junto con el tiempo de retención, creando las condiciones mínimas necesarias para que las bacterias inicien el proceso de transformación química teniendo como resultado la liberación de gas.

Tabla 4 *Relación estiércol-agua para la generación de Biogás.*

| Estiércol | Relación estiércol-agua |
|------------------|---|
| Bovinos | (1:3) 1 kilo de estiércol: 3 litros de agua |
| Porcinos | (1:4) 1 kilo de estiércol: 4 litros de agua |
| Llama/Oveja/Cuy | (1:8-9) 1 kilo de estiércol: 8 o 9 litros de agua |

Nota: Tomada de (Martí, 2019)

3.1.3. pH

El pH, es un parámetro que indica la alcalinidad o acidez presente en el sustrato, y el cual permite u obstaculiza las reacciones químicas que generan compuestos en cada una de las fases de la digestión. (Porkcolombia., 2020)

Los valores de pH más recomendables en la implementación de biodigestores de bajo costo son los próximos a la neutralidad, es decir, valores entre 6,5 y 7,5. En este rango, las bacterias pueden realizar su trabajo, aunque no siempre en el punto óptimo para su máxima actividad. (Martí, 2019)

3.1.4. Tóxicos e Inhibidores

Se pueden encontrar cierto tipo de sustancias en los biodigestores que pueden causar lentitud en el proceso o ser inhibitorias o tóxicas para las bacterias. Estas sustancias tóxicas pueden venir en los sustratos que alimentan el biodigestor o ser el resultado de reacciones dentro del mismo. Si provienen de la materia orgánica se pueden encontrar metales pesados, oxígeno, cianuro, antibióticos, desinfectantes, fenoles, amoníaco, y compuestos halogenados, entre otros. De lo contrario, si provienen de reacciones en el biodigestor se pueden encontrar sulfuros, sulfatos, amoníaco, hidrógeno y ácidos grasos volátiles entre otros compuestos que generan inhibición. (FAO., 2011), (Porkcolombia., 2020)

3.1.5. Temperatura

La temperatura es un factor que está interconectado con todo el proceso en el biodigestor, influye en la velocidad de las reacciones, en el crecimiento de las bacterias, en la capacidad de estas para metabolizar compuestos, en la estabilidad de las moléculas entre otros. Al igual que el pH, las bacterias trabajan a temperaturas óptimas diferentes para llegar a su máximo de rendimiento, por esta razón, superar o no alcanzar su temperatura adecuada puede causar inconvenientes en el proceso de digestión. (Porkcolombia., 2020)

Las temperaturas de trabajo de las bacterias se clasifican en: psicrófilas, temperaturas inferiores a 25°C; mesófilas, temperaturas entre los 32°C y 42°C; y termófilas temperaturas entre 50°C y 60°C (Gaballah, 2020). Según Martí (2019) las bacterias prefieren temperaturas entre los 35° a 37°C.

3.1.6. Tiempo de Retención

A mayor temperatura, mayor velocidad de trabajo de las bacterias, menor tiempo del sustrato en el biodigestor y por ende menor tiempo requerido por el consorcio bacteriano para producir biogás, en otras palabras, menor tiempo de retención. (Porkcolombia., 2020)

Según lo señalado por Martí (2019), el tiempo de retención en el biodigestor se refiere al período en el que la carga diaria atraviesa completamente el sistema antes de ser evacuada por la salida. Si este tiempo es menor al requerido por las bacterias, se producirá una menor cantidad de biogás e incluso puede generarse principalmente dióxido de carbono con muy poco metano. Por otro lado, si se otorga demasiado tiempo a las bacterias, se aprovechará al máximo el potencial de biogás de la carga diaria, pero esto implicará la necesidad de biodigestores más grandes y, por lo tanto, costos mayores.

Es importante adaptar el tiempo de retención a la temperatura de trabajo en el biodigestor. En la tabla 5, se puede observar la relación entre temperatura y tiempo de retención adecuado para la generación de biogás.

Tabla 5

Relación entre temperatura y tiempo de retención.

| Temperatura °C | Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) días |
|----------------|---|
| 35 | 25-30 |
| 30 | 30-40 |
| 25 | 35-50 |
| 20 | 50-65 |
| 15 | 65-90 |
| 10 | 90-125 |

Nota: Tomado de (Martí, 2019)

Metodología

El presente proyecto de investigación busca determinar la viabilidad técnico-financiera para implementar un biodigestor tubular que permita el aprovechamiento del estiércol porcino para la generación de biogás en la finca El Líbano, Cepitá (Santander).

Inicialmente se plantea realizar una investigación acerca de casos de estudio donde se tengan experiencias respecto al funcionamiento de biodigestores tubulares en Colombia alimentados con estiércol de porcino, logrando obtener información que permita ser un referente y mediante las lecciones aprendidas se logre contextualizar en el caso de estudio.

Una vez identificados los casos de estudio, realizar el análisis técnico determinando los parámetros mínimos requeridos, identificando las características geográficas, requerimientos y especificaciones técnicas necesarias para la implementación del biodigestor en la finca el Líbano.

Seguidamente establecer los costos asociados al biodigestor tubular a implementar en la finca El Líbano y realizar un análisis financiero comparativo de dos escenarios, uno donde se evidencie los gastos asociados al consumo de GLP (escenario actual) y otro donde se proyecte los costos asociados a la implementación del biodigestor tubular.

Según los objetivos específicos planteados en el proyecto se propone desarrollar las siguientes actividades relacionadas en la tabla 6:



Tabla 6 *Metodología*

| Objetivos | Actividades |
|--|---|
| <p>Identificar casos de estudio sobre el uso de biodigestores tubulares aprovechando el estiércol de porcino para la generación de biogás en diferentes fincas del país.</p> | <p>Realizar una consulta bibliográfica en diferentes bases de datos y recursos electrónicos disponibles haciendo uso de palabras claves.</p> <p>Identificar y seleccionar los casos encontrados, verificando las fuentes y referencias bibliográficas las cuales soporten los casos de estudio relacionados.</p> <p>Documentar los casos de estudio en un cuadro comparativo, relacionando información sobre el tema de investigación, características del lugar de estudio, biodigestor implementado y lecciones aprendidas.</p> |
| <p>Determinar los requisitos técnicos y operativos para la implementación de biodigestores tubulares según el caso de estudio a analizar.</p> | <p>Realizar la búsqueda de los parámetros a tener en cuenta en la construcción y montaje de un biodigestor tubular</p> <p>Elaborar una matriz de requisitos y de cumplimiento para determinar la viabilidad del caso de estudio.</p> |
| <p>Definir la viabilidad financiera para la implementación de un biodigestor tubular en la finca el Líbano, Cepitá-Santander.</p> | <p>Estimar los costos de inversión y de operación del biodigestor tubular a implementar.</p> <p>Calcular los costos asociados al consumo de GLP de la familia que habita la Finca El Líbano</p> <p>Realizar un análisis comparativo de los dos escenarios anteriormente planteados y determinar la viabilidad financiera</p> |

Durante el desarrollo de los objetivos específicos propuestos se tiene los siguientes resultados o hallazgos.



Resultados o hallazgos

Objetivo 1

Se realizó la consulta bibliográfica en diferentes bases de datos a través de los recursos electrónicos disponibles por la biblioteca de la Corporación Universitaria UNITEC, catálogo bibliográfico electrónico de la Universidad Industrial de Santander, Google Académico y publicaciones de la Red de Biodigestores para Latinoamérica y el Caribe (RedBiolac) haciendo uso de palabras claves como: Biogás, Digestión Anaerobia, Biogás a partir de estiércol de Porcino, Biodigestores en Colombia entre otros

Como resultado de la investigación realizada se citan cinco casos de estudio representativos donde se relaciona el título del caso de estudio, el autor o autores, entidad e institución, tipo de estudio, datos de publicación, municipio de ejecución y los aportes, resultados y conclusiones del estudio los cuales soportan la importancia de la implementación de un biodigestor tubular.

Caso de Estudio 1

Título: Diseño y Construcción de un Biodigestor de Bajo Costo para Producción de Combustible en Áreas Rurales

Autor / Autores: Oscar Antonio Valencia Potes

Entidad / Institución: Corporación Universitaria Autónoma de Occidente

Tipo de Estudio: Trabajo de grado (Programa de Ingeniería Mecánica)

Datos de Publicación: Cali, Valle del Cauca, Colombia, 1987

Municipio de Ejecución: Caloto, Cauca

Aportes, resultados y conclusiones del estudio: El trabajo reúne la experiencia adquirida por el autor en la instalación y puesta en funcionamiento de un Biodigestor tipo Taiwán o tubular, colocado en operación en la vereda Morales, municipio de Caloto (Norte Caucaño) capaz de operar con pisos térmicos entre cero y 3000 m.s.n.m. Los materiales fueron de fabricación nacional y de consecución local. Las obras de adecuación requirieron de tres jornales, el montaje del Biodigestor tomó tres horas y la producción estable de biogás y fertilizante se obtuvo 50 días

después de su instalación. El Biodigestor con las dimensiones expuestas en el estudio, produjo continuamente combustible suficiente para seis horas diarias de cocción y esto permitió la preparación de los alimentos consumidos a diario por una familia campesina, requiriendo para su funcionamiento de las excretas producidas diariamente por una vaca, un caballo y tres cerdos de cría. El costo total de los jornales para las obras de adecuación y materiales necesarios para su construcción no ascendieron a más de \$60.000 (junio de 1987) alcanzando una vida útil de más de ocho años. Las dimensiones pudieron ser incrementadas ampliamente y a escala hasta un nivel agroindustrial, dependiendo de la cantidad de excretas disponibles y del volumen diario de biogás y fertilizante que se necesite producir. (Valencia Potes, 1987)

Caso de Estudio 2

Título: Producción de Biogás a partir de Estiércol Porcino a Escala Piloto: Casa de Estudio Biorreactor Continuo Tubular Plástico (BCTP) Finca Tosoly

Autor / Autores: Carlos Didier Bayona Páez, Brayan Steek Cortés Luengas

Entidad / Institución: Universidad Industrial de Santander

Tipo de Estudio: Trabajo de grado (Programa de Ingeniería Química)

Datos de Publicación: Bucaramanga, Santander, Colombia, 2015

Municipio de Ejecución: Guapotá, Santander

Aportes, resultados y conclusiones del estudio: Según el estudio, se comprobó que el biorreactor continuo tubular plástico de la finca Tosoly, que a la fecha 2015 tenía 15 años de instalado, presentaba un desempeño favorable dado que para una carga de 1:7 excretas-aguas alcanzó un rendimiento en producción de biogás entre 0.4 – 0.5 m³/día. El inóculo respondió al cambio de la carga, durante 70 días de operación, mejorando la producción de biogás, así mismo el monitoreo fisicoquímico del biorreactor permitió evidenciar que su desempeño era estable, la operación técnica era sencilla, por lo tanto, representó una excelente alternativa de suministro energético a nivel rural. (Bayona Páez, 2015)

Caso de Estudio 3



Título: Factibilidad de la Implementación de un Biodigestor que Transforme Estiércol de Porcino en Biogás y Biofertilizante para la Venta Comercial, en la Finca La Primavera, Municipio De Lejanías, Meta.

Autor / Autores: Jorge Alfonso Castaño Orjuela

Entidad / Institución: Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Tipo de Estudio: Trabajo de grado (Programa de Tecnología en Sistemas Agroforestales)

Datos de Publicación: Acacías, Meta, Colombia, 2017

Municipio de Ejecución: Lejanías, Meta

Aportes, resultados y conclusiones del estudio: El trabajo abordó las directrices generales para el diseño de una planta de producción de biogás utilizando residuos animales porcinos en la finca La Primavera, ubicada en el municipio de Lejanías, Meta. El objetivo de este estudio fue evaluar la viabilidad técnica y económica del proyecto, comparando los costos de instalación y operación con las posibles ganancias derivadas de la comercialización de productos en el mercado, como el biogás y el bioabono.

El proyecto se planteó como una solución directa para abordar el manejo y la disposición del gran volumen de estiércol generado por los casi 100 cerdos presentes en la finca. Además, se consideró una solución indirecta que contribuiría a la mitigación de los gases emitidos a la atmósfera, como el CH₄ y el CO₂, al mismo tiempo que se convertiría en una fuente de generación de energías alternativas. La metodología se basó en visitas a diversos nichos, donde se recopiló información a través de encuestas para comprender el comportamiento del mercado, esta información se analizó y se determinó la viabilidad del proyecto mediante indicadores de valoración económica. En el proceso de desarrollo del estudio, se tomaron como referencia estructuras generales de análisis de factibilidad elaboradas por diferentes autores, así como conceptos asociados al proceso de gasificación que contribuyeron a comprender la naturaleza del proyecto.

Caso de Estudio 4

Título: Implementación de un Biodigestor para el Aprovechamiento de los Residuos de las Granjas Porcinas en el Municipio de Tibana

Autor / Autores: Esther Nayive Gómez López, José Samuel Rodríguez Reyez, Angela Torres Martínez

Entidad / Institución: Universidad Católica De Colombia

Tipo de Estudio: Especialización Formulación y Evaluación Social y Económica de Proyectos

Datos de Publicación: Bogotá, Cundinamarca, Colombia, 2017

Municipio de Ejecución: Tibaná, Boyacá

Aportes, resultados y conclusiones del estudio: El principal objetivo del proyecto fue la construcción de un biodigestor en el Municipio de Tibaná, con el propósito de reducir la contaminación generada por los desechos de cerdo. Luego de llevar a cabo un estudio de investigación exhaustivo y analizar los aspectos técnicos, financieros y ambientales del proyecto, se llegó a la conclusión de que no era viable. Esto se debe a que la Tasa Interna de Retorno (TIR) arrojó un valor de -0,32% y el Valor Presente Neto (VPN) fue de -\$30.049.790, lo que indica una rentabilidad negativa. Además, el retorno de la inversión previsto a través de la generación y venta de energía eléctrica y bioabono no era suficiente, ya que el retorno de la inversión se evidenciaría a partir del cuarto año, en consecuencia, el proyecto no resultaba viable a corto y mediano plazo, sin embargo, se consideró que a largo plazo podría ser beneficioso implementar el biodigestor.

Caso de Estudio 5

Título: Diseño e Implementación de un Biodigestor en la Granja Porcícola San Sebastián del Municipio de Timaná – Huila, como Estrategia de Aprovechamiento de los Residuos Generados para la Fertilización de Pasturas y la Generación de Biogás.

Autor / Autores: Jhon Faiver Rojas Reyes / Liliana Ñañez Muñoz

Entidad / Institución: Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Tipo de Estudio: Trabajo de grado (Programa de Agronomía e Ingeniería Forestal)

Datos de Publicación: Pitalito, Huila, Colombia, 2018

Municipio de Ejecución: Timaná, Huila

Aportes, resultados y conclusiones del estudio: La implementación del biodigestor tipo Taiwán en la granja Porcícola San Sebastián generó resultados positivos en varios aspectos. En primer lugar, cuatro familias lograron ahorrar dinero gracias a la buena producción de biogás.

Además, se contribuyó a la reducción de la deforestación para la cocción de alimentos y se disminuyó la contaminación en la cercana quebrada Piragua. También se obtuvieron resultados favorables en el suelo al utilizar el agua residual del biodigestor, lo que aumentó la producción de pasturas y biomasa, así como mejoró la calidad del suelo.

En el anexo 1 se sintetiza la información consultada y obtenida de la investigación, se relacionan los casos de estudio documentados y soportados técnicamente, sobre experiencias llevadas a cabo en diferentes zonas rurales del país, las cuales relacionaron o desarrollaron procesos a través del uso e implementación de biodigestores para la obtención de biogás.

El común denominador de los casos consultados se ve reflejado en las buenas prácticas adquiridas durante la implementación y puesta en marcha de los biodigestores construidos, se concluye que independientemente del clima, altura, temperatura es posible y viable la implementación del biodigestor tipo tubular.

Objetivo 2

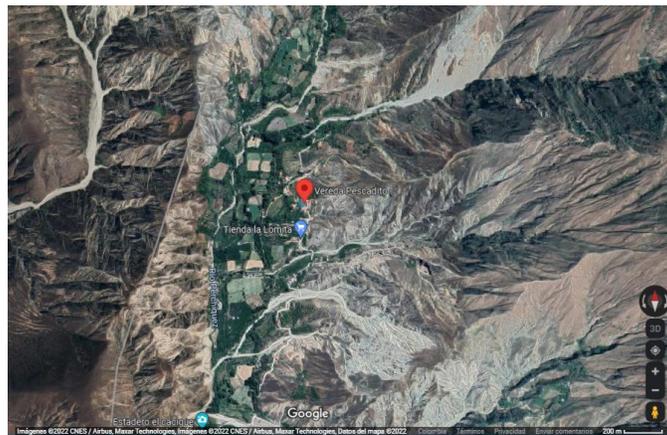
Es importante conocer qué características tiene el sitio de estudio, en el cual se busca evaluar que tan factible sería implementar un biodigestor de tipo tubular el cual se permita aprovechar el estiércol de los porcinos y mediante el proceso de la digestión anaerobia, obtener biogás en primera instancia para uso doméstico. Los parámetros técnicos a analizar para la implementación del biodigestor son: estiércol disponible diario, mezcla con agua, carga diaria al biodigestor, temperatura y tiempo de retención, volumen líquido del biodigestor.

Se considera realizar un análisis técnico con base en la guía de diseño y manual de instalación de biodigestores tubulares escrito por el doctor Jaime Martí Herrero, experto mundial quien lideró y coordinó el proyecto de biogás de la cooperación técnica alemana logrando la instalación de 750 biodigestores adaptados en clima frío en Ecuador y quien actualmente participa en el desarrollo de programas nacionales de biogás en países latinoamericanos (Biodigestores, 2020).

Los parámetros relacionados para el análisis técnico son de tipo geográfico, técnicos y operativos según el caso de estudio a analizar. Estos parámetros son los mínimos requeridos para determinar la viabilidad de implementar un biodigestor de tipo tubular.

Los parámetros geográficos relacionan las características de la finca tales como la ubicación, (ver ilustración 8), clima, altura sobre el nivel del mar y la disponibilidad del agua.

Ilustración 8 *Localización Finca El Líbano, Cepitá - Santander.*



Nota: Tomado de (Google Maps, 2022)

La finca el Líbano se encuentra ubicada en la vereda Pescadito, jurisdicción del municipio de Cepitá en el departamento de Santander, “corazón del imponente Cañón del Chicamocha” (Cepitá, 2022), la altura oscila alrededor de los 800 m.s.n.m y la temperatura promedio es de 28°C, los lugareños centran su economía familiar en cultivos frutales cítricos especialmente limón criollo, naranja valencia, tangelo, y como actividad económica emergente la porcicultura.

La finca cuenta con suministro de agua proveniente de nacimiento llamado “el salto” y el aprovechamiento de la quebrada Perquichez debido a la canalización y conducción a través de mangueras, esto garantiza la fertilidad y viabilidad de cultivos agrícolas y fuente de sostenimiento para los animales de granja y corral.

Actualmente la finca cuenta con una cochera y un total de diez cerdos adultos de peso promedio 100 Kg/cerdo. La cantidad de estiércol diario producido por cada cerdo es de cuatro (4) kilogramos para un total de cuarenta (40) kilogramos diarios promedio.

En los biodigestores tubulares, la relación de mezcla estiércol de cerdo – agua es de 4:1, por lo tanto, la carga diaria estará compuesta por un 20% de estiércol de cerdo y 80% de agua, habiendo cuatro litros de agua por cada kg de estiércol de cerdo. (Martí, 2019). La carga diaria requerida para alimentar el biodigestor a implementar en la finca El Líbano es de 200 litros al día, la cual consta de 40 Kg de estiércol diario generado por los cerdos más 160 litros de agua.

Según la altura correspondiente a la región del trópico que está sobre los 800 m.s.n.m y el clima cálido de la finca el Líbano, la temperatura de trabajo del biodigestor se asemeja a la temperatura ambiente, la cual oscila alrededor de los 28°C, ideal para que el desempeño bacteriano al interior del biodigestor no requiera diseño solar exterior, el cual no es más que la construcción de un invernadero, representando costos adicionales. (Gaballah, 2020)

Según la tabla 7 propuesta por Martí Herrero, teniendo en cuenta la temperatura de trabajo del biodigestor (28°C) y el tipo de estiércol se determina el tiempo de retención en días y la producción de biogás (litros/kg). Por lo tanto, para el caso de estudio se obtiene un tiempo de retención de 30 días, la producción de biogás de 67 litros/kg, el volumen líquido del biodigestor será de 200 litrosx30=6000 litros, equivalente a 6 m3.

Se busca que el biogás producido sea aprovechable como combustible para la cocción y preparación de alimentos de la familia quienes habitan la finca el Líbano, la cual está compuesta por 6 personas, quienes de lunes a domingo realizan la preparación de tres comidas, para esto hacen uso de estufa de cuatro puestos alimentada con Gas Licuado de Petróleo (GLP), la cual consume 1,55 Kwh/hornilla según especificaciones del equipo.

Tabla 7 *Producción de biogás según la temperatura y tiempo de retención*

| Temperatura de trabajo del biodigestor (°C) | Estiércol de vaca fresco | | Estiércol de cerdo fresco | |
|---|--------------------------|----------------|---------------------------|----------------|
| | Tiempo de Retención (d) | Biogás* (l/kg) | Tiempo de Retención (d) | Biogás* (l/kg) |
| 33-37 | 30 | 39 | 25 | 71 |
| 28-32 | 40 | 38 | 30 | 67 |
| 23-27 | 50 | 35 | 35 | 61 |
| 18-22 | 65 | 33 | 50 | 59 |
| 13-17 | 90 | 31 | 65 | 54 |
| 8-12 | 125 | 29 | 90 | 50 |

*El Biogás está expresado para 25°C y 1 atmósfera de presión, suponiendo 65% de contenido de metano (CH₄). Se ha considerado en el estiércol de vaca 16% ST, 80% SV/ST y 0,2 m³CH₄/Kg_{sv}; y para el estiércol de cerdo 20% ST, 75% SV/ST y 0,3 m³CH₄/Kg_{sv}

Nota: *Tomada de (Martí, 2019)*

Ilustración 9 Matriz de Requisitos y Cumplimiento

| Parámetros | Condiciones para un Biodigestor Tubular | Condiciones en la Finca El Líbano, Cepitá (Santander) | Cumple | No Cumple |
|---|---|---|--------|-----------|
| Geográficos | | | | |
| Región | Trópico/Valles bajos/Valles altos/ Altiplano | Trópico | X | |
| Altura sobre el nivel del mar | < 1000/1000-2000/>2000<3000/>3000 msnm | 660 msnm | X | |
| Cercanías a ríos o corrientes de agua | Evitar zonas inundables | No | X | |
| Técnicos | | | | |
| Tipo de Biodigestor según su uso | Biodigestor Familiar | Biodigestor Familiar | X | |
| Dimensiones | Mínimo: L: 7m / A: 1m / Ancho Inf: 0,65 m / Ancho Sup: 1,15 m / Circ: 4m/ | L: 7m / A: 1m / Ancho Inf: 0,65 m / Ancho Sup: 1,15 m / Circ: 4m/ | X | |
| Material | Geomembrana o plástico | Geomembrana | X | |
| Sin diseño calefacción solar pasiva | Climas Tropicales < 1000 msnm | Clima Trópico | X | |
| Con diseño calefacción solar pasiva | Clima Templado > 1500 msnm | No Aplica | | X |
| Ubicación de la zanja | Cerca del lugar donde está el estiércol disponible | < 100m de la cochera | X | |
| Punto de consumo | Cerca del lugar donde está el biodigestor | < 500 m del biodigestor | X | |
| Operativos | | | | |
| Tipo de estiércol | Porcino/Vaca/Cabra/Llama | Porcino | X | |
| Cantidad de estiércol (Kg/d) en clima tropical | 20 a 30 Kg | < 30 Kg | X | |
| Relación estiércol:agua en clima tropical | 1:4 | 1:4 | X | |
| Carga Diaria al Biodigestor: estiércol y agua (l/d) en clima tropical | < 175 l/d | < 175 l/d | X | |
| Temperatura de Trabajo sin diseño solar | 23 a 27°C | 26°C | X | |
| Tiempo de Retención en clima tropical | 25 a 40 días | 25 a 40 días | X | |

Nota: Adaptado de (Martí, 2019)

Según la ilustración 9, se determina que el proyecto es factible técnicamente para la implementación del biodigestor tubular en la finca El Líbano ya que reúne y cumple todos los parámetros mínimos requeridos según la matriz de requisitos y cumplimiento propuesta.

Objetivo 3

Para determinar la viabilidad financiera de implementar un biodigestor tubular se anexa la tabla 8 con los materiales requeridos para la construcción y montaje del biodigestor según la guía de diseño y manual de instalación de Martí Herrero (2019), asimismo se anexa el presupuesto estimado, basado en cotizaciones solicitadas a diferentes ferreterías en Bucaramanga, Santander.

Tabla 8 *Costos de Materiales, Recursos e Insumos*

| Materiales, recursos e insumos | Cantidad | Valor Unitario | Valor Total |
|--|---------------------|-----------------------|--------------------|
| Excavación | | | |
| Plásticos | 10*4 mt | \$5,600 | \$95,000 |
| Sacos | 20 | \$1,000 | \$20,000 |
| Pico | 3 und | \$58,000 | \$174,000 |
| Pala | 3 und | \$32,000 | \$96,000 |
| Flexómetro | 1 und | \$31,000 | \$31,000 |
| Mano de obra | 3 personas * 7 días | \$350,000 | \$1,050,000 |
| Biodigestor Tubular | | | |
| Manga Tubular 7 metros (250 micrones) | 2 und | \$250,000 | \$500,000 |
| Tubería de Desagüe de PVC (6") | 3 metros | \$46,667 | \$140,000 |
| Liga de Neumático | 40 metros | \$20,000 | \$20,000 |
| Adaptador de Tanque en PVC (1/2" o 3/4") | 1 und | \$46,900 | \$46,900 |
| Tubería de Agua (1/2" o 3/4") | 3 metros | \$10,200 | \$30,600 |
| Accesorios PVC | | \$20,000 | \$20,000 |
| Cuerda Plástica (1/4") | 17,5 metros | \$197,000 | \$197,000 |
| Teflón | 1 und | \$15,000 | \$15,000 |
| Válvula de Alivio: Tee | 1 und | \$15,000 | \$15,000 |
| Tubo de 30 cm | 1 und | \$49,000 | \$49,000 |
| Llave de Paso Plástica | 1 und | \$29,800 | \$29,800 |
| Tijera | 1 und | \$25,000 | \$25,000 |
| Sierra de metal | 1 und | \$50,000 | \$50,000 |
| Llave de Tubo | 2 und | \$38,500 | \$77,000 |
| Rotulador | 1 und | \$48,000 | \$48,000 |
| Conducción de Biogás | | | |
| Tubería de Agua (1/2" o 3/4") | 15 metros | \$10,200 | \$153,000 |
| Llaves de Bola (1/2" o 3/4") | 2 und | \$4,250 | \$8,500 |
| Tee (1/2" o 3/4") | 1 und | \$15,000 | \$15,000 |
| Codo (1/2" o 3/4") | 1 und | \$5,000 | \$5,000 |
| Unión Universal (1/2" o 3/4") | 1 und | \$19,000 | \$19,000 |

| | | | |
|--------------------------|-------------------------------|-----------|--------------------|
| Teflón | 2 und | \$7,500 | \$15,000 |
| Depósito Plástico | 2 m largo, 2 m circunferencia | \$50,000 | \$50,000 |
| Tarrajá | 1 und | \$195,000 | \$195,000 |
| Pegamento PVC | 1 und | \$38,000 | \$38,000 |
| Destornillador | 1 und | \$10,800 | \$10,800 |
| Presupuesto Total | | | \$3,238,600 |

Una vez determinado los costos de materiales, recursos e insumos correspondientes a la construcción del biodigestor, se calcula los costos asociados al consumo de GLP de la familia que habita la Finca El Líbano.

En el mercado existen más de tres presentaciones de cilindro GLP, las más comerciales son los cilindros de tamaño pequeño de 33 lb, mediano de 40 lb y grande de 100 lb, esto según lo consultado con tres empresas distribuidoras que frecuentan y abastecen el municipio mensualmente.

La presentación del cilindro que regularmente adquiere la familia es de tamaño pequeño debido al presupuesto familiar disponible, sin embargo, se realiza el cálculo estimado para las tres presentaciones. Para efectos de cálculo se trabajará en Kg y con dos cifras decimales, en la tabla 9 se resume la información.

Tabla 9 *Precio Cilindros de GLP*

| Tamaño | Presentación Cilindro GLP | | Valor Promedio Empresas Distribuidoras de GLP | Tarifa \$/Kg |
|----------------|------------------------------|---------------|---|--------------|
| | Peso (Lbs) | Peso (Kgs) | | |
| Pequeño | 33 | 15.0 | \$ 164,750.00 | \$ 11,006.41 |
| Mediano | 40 | 18.1 | \$ 175,000.00 | \$ 9,645.22 |
| Grande | 100 | 45.4 | \$ 240,000.00 | \$ 5,291.09 |

Tabla 10 *Consumo Promedio de GLP*

| Electrodoméstico | No. de Hornilla | Capacidad (kWh) | Horas de | | | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | | Trabajo Promedio /día | Consumo (Kg/día) | Consumo (Kg/mes) | Consumo (Kg/año) |
| Cocina a Gas Licuado de Petróleo | 1 | 1.55 | 5.5 | 0.61 | 18.31 | 219.69 |
| | 2 | 3.1 | 4 | 0.89 | 26.63 | 319.54 |
| | 3 | 4.65 | 3.25 | 1.08 | 32.45 | 389.44 |
| | 4 | 6.2 | 2.5 | 1.11 | 33.29 | 399.43 |

Según la información de la tabla 10, a mayor número de hornillas se requiere de mayor capacidad (kWh) pero menor tiempo de trabajo por día. Para el cálculo del consumo de GLP se aplicaron las siguientes fórmulas: (PropanoGas, 2022)

$$\text{Consumo} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{día}} \right) = \left(\frac{\text{Capacidad (kWh)}}{13.97 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{Kg}} \right)} \right) * \text{Horas de trabajo Prom/día}$$

$$\text{Consumo} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{mes}} \right) = \text{Consumo} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{día}} \right) * 30 \text{ días/mes}$$

$$\text{Consumo} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{año}} \right) = \text{Consumo} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{mes}} \right) * 12 \text{ meses/año}$$

$$\text{Capacidad Calorífica del GLP} = 13.97 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{Kg}} \right)$$

Tabla 11 *Costo Mensual de GLP*

| Cocina a GLP | | Cilindro Pequeño | Cilindro Mediano | Cilindro Grande |
|---------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| No. Hornillas | Consumo (Kg/mes) | \$/Mes | \$/Mes | \$/Mes |
| 1 | 18.31 | \$ 201,495.31 | \$ 176,575.94 | \$ 96,864.52 |
| 2 | 26.63 | \$ 293,084.09 | \$ 256,837.73 | \$ 140,893.84 |
| 3 | 32.45 | \$ 357,196.24 | \$ 313,020.98 | \$ 171,714.37 |
| 4 | 33.29 | \$ 366,355.12 | \$ 321,047.16 | \$ 176,117.30 |

El cálculo del costo \$/ mes se realiza de la siguiente forma:

$$\text{Costo} \left(\frac{\$}{\text{mes}} \right) = \text{Consumo} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{mes}} \right) * \text{Tarifa Cilindro} \left(\frac{\$}{\text{Kg}} \right)$$

Según lo apreciado en la tabla 11, la presentación del cilindro influye en el costo mensual, a mayor tamaño del cilindro menor costo asociado, por lo tanto, se estima que es más viable adquirir cilindros de 100 libras ya que el costo mensual se reduciría alrededor de un 50% comparado con el costo representativo del cilindro de 33 libras al cocinar con 4 hornillas al tiempo.

Tabla 12 *Costo Anual de GLP*

| Año | \$/Año (Cilindro 15 Kg) | \$/Año (Cilindro 18 Kg) | \$/Año (Cilindro 45 Kg) |
|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Año 1 | \$ 4,396,261.39 | \$ 3,852,565.94 | \$ 2,113,407.60 |
| Año 2 | \$ 4,703,999.69 | \$ 4,122,245.56 | \$ 2,261,346.13 |
| Año 3 | \$ 5,080,319.67 | \$ 4,452,025.20 | \$ 2,442,253.82 |
| Total | \$ 14,180,580.75 | \$ 12,426,836.70 | \$ 6,817,007.56 |

Según lo apreciado en la tabla 12, se calcula el costo asociado al consumo de gas anual para los tres tamaños de cilindro GLP, pequeño (15 Kg), mediano (18 Kg) y grande (45 Kg), así mismo se considera que la familia hará uso de cuatro hornillas a la hora de cocinar.

Adicionalmente, se realiza la proyección a tres años considerando un aumento al segundo año del 7% y el tercer año del 8% correspondiente a las diferentes alzas de GLP según el comportamiento derivado del histórico de precios.

Al término de tres años, el costo total asociado al consumo de GLP en cilindros de 15 Kg es de \$ 14,180,580.75, lo equivalente a 80 cilindros.

A continuación, se muestra la tabla 13 donde se relaciona los costos proyectados durante tres años, evidenciando los costos de materiales, recursos e insumos, mantenimiento y reparación, imprevistos y gastos administrativos.

Durante el primer año se tienen los costos asociados a los materiales, recursos e insumos requeridos para la ejecución de las obras civiles, arme del biodigestor, pruebas de

funcionamiento y aseguramiento del biodigestor, es importante tener en cuenta que una vez instalado y colocado en funcionamiento el biodigestor este requerirá de monitoreo y supervisión para su óptimo funcionamiento. Se requerirá del acompañamiento de un experto y un equipo de trabajo que brinde el soporte cuando se presenten imprevistos o fallas durante el funcionamiento del equipo. Se requiere además de un plan de capacitación para que la familia residente en la finca El Líbano realice procedimientos seguros y confiables para el aprovechamiento del estiércol de cerdo para la generación de Biogás.

Para los dos años siguientes se consideran costos de materiales mínimos requeridos en caso de que se presente alguna falla, avería o daño en el sistema, el plan de mantenimiento preventivo y correctivo en caso de presentarse algún imprevisto y gastos administrativos representativos.

Tabla 13 *Costo Anual del Biodigestor*

| Año | Biodigestor (Costos de Materiales, Recursos e Insumos) | Mantenimiento y Reparación | Imprevistos | Gastos Administrativos | Total |
|--------------|---|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Año 1 | \$3,238,600.00 | \$467,430.00 | \$311,620.00 | \$685,564.00 | \$4,703,214.00 |
| Año 2 | \$249,296.00 | \$560,916.00 | \$358,363.00 | \$54,845.12 | \$1,223,420.12 |
| Año 3 | \$274,225.60 | \$701,145.00 | \$430,035.60 | \$60,329.63 | \$1,465,735.83 |
| Total | \$3,639,721.60 | \$1,729,491.00 | \$1,100,018.60 | \$800,738.75 | \$7,392,369.95 |

En la tabla 14 se recopila los costos durante tres años los cuales están asociados al implementar el biodigestor tubular y los costos correspondientes al consumo de GLP.

Tabla 14 *Costo Anual del Biodigestor vs GLP*

| Año | Costo Anual Biodigestor Tubular | Costo Anual GLP (Cilindro 15 Kg) |
|--------------|--|---|
| Año 1 | \$4,703,214.00 | \$4,396,261.39 |
| Año 2 | \$1,223,420.12 | \$4,703,999.69 |
| Año 3 | \$1,465,735.83 | \$5,080,319.67 |
| Total | \$7,392,369.95 | \$14,180,580.75 |

Al cabo del primer año se hace mucho más rentable hacer uso del cilindro de GLP ya que hay una diferencia de \$ 306,952.61, esto se ve reflejado ya que al momento de ser instalado el biodigestor requiere de un tiempo de retención de 30 días para el procesamiento del volumen líquido ingresado al biodigestor y cada una de las pruebas técnicas realizadas para la producción continua y/o estabilizada de biogás.

Durante el segundo año se evidencia la reducción de costos en un margen del 26% y para el tercer año se reducen los costos alrededor del 29 %, para un total promedio del 51,26% durante los tres años comparados.

Mientras el costo anual del GLP tiene un comportamiento incremental, el costo del biodigestor tubular decrece con el paso de tiempo haciendo que sea factible financieramente la implementación del biodigestor en la finca El Líbano.

Conclusiones

- Es factible técnica y financieramente implementar un biodigestor tubular para el aprovechamiento del estiércol de porcino en la generación de biogás en la finca el Líbano, municipio de Cepitá, Santander.
- La consulta bibliográfica realizada a través de diversas fuentes bibliográficas y la RedBiolac, permitió la identificación de cinco casos de estudio representativos que destacan la importancia de la implementación de un biodigestor tubular. Los casos de estudio proporcionan información valiosa sobre los beneficios ambientales, económicos y sociales del uso de biodigestores tubulares en diferentes contextos y regiones de Colombia. Los resultados obtenidos respaldan la importancia de la promoción y adopción del biodigestor tubular como una alternativa sostenible para la gestión de residuos y la producción de energía renovable.
- Es favorable técnicamente implementar un biodigestor tubular en la finca El Libano, Cepitá (Santander) debido a la disponibilidad de agua necesaria y la cantidad diaria de estiércol producido por los cerdos. Además, la temperatura de trabajo del biodigestor es óptima para el desempeño bacteriano, lo que significa que no se necesitarían costosos diseños solares exteriores. Asimismo, se ha determinado el tiempo de retención en días y la producción de biogás para el tipo de estiércol y temperatura de trabajo del biodigestor, lo que permitirá conocer la cantidad de biogás a producir.
- Los costos asociados al biodigestor y al gas licuado de petróleo (GLP) pueden fluctuar debido a diversos factores, los costos de los cilindros de GLP pueden experimentar cambios significativos a lo largo del tiempo, mientras que los costos asociados al biodigestor son más estables y pueden generar ahorros significativos a largo plazo. Por lo tanto, el uso de un biodigestor puede ser una opción más económica y sostenible a lo largo del tiempo, especialmente considerando la tendencia al alza en los precios de los combustibles fósiles.

- El biodigestor tubular puede ser una herramienta valiosa para mitigar el cambio climático, reducir los costos de energía y mejorar la calidad de vida de las personas en comunidades rurales y periurbanas. Al proporcionar una fuente de energía renovable y sostenible para la cocción de alimentos, el biodigestor tubular puede reducir el consumo de leña o gas licuado de petróleo (GLP) y mejorar la gestión de los recursos naturales.

Recomendaciones

- Se recomienda implementar la construcción de un biodigestor tubular para la generación de biogás en la finca El Líbano, siendo este aprovechable para la cocción de los alimentos y optimización de recursos asociados al consumo de gas licuado de petróleo.
- Para la construcción del biodigestor tener en cuenta la guía de diseño y manual de instalación de biodigestores tubulares por Jaime Martí Herrero, así mismo conformar un equipo de trabajo con mano de obra calificada que cuente con la experiencia para la realización de las obras civiles y construcción del biodigestor.
- Determinar la viabilidad técnica y financiera para el aprovechamiento del biogás para la generación de energía eléctrica y uso del biol como base para la elaboración de fertilizantes aprovechables para los diferentes cultivos de la finca.

Referencias

- Bayona Páez, C. y. (2015). *Producción de Biogás a partir de Estiércol Porcino a Escala Piloto: Casa de Estudio Biorreactor Continúo Tubular Plástico (BCTP) Finca Tosoly*. Bucaramanga.
- Biodigestores, R. d. (2020). *Red Biolac*. Obtenido de <http://redbiolac.org/personnel/jaime-marti-herrero/>
- Castaño Orjuela, J. (2017). *Factibilidad de la Implementación de un Biodigestor que Transforme Estiércol de Porcino en Biogás y Biofertilizante para la Venta Comercial, en la Finca La Primavera, Municipio De Lejanías, Meta*. Acacias.
- Cepero et al, .. (2012). *Producción de biogás y de bioabonos a partir de efluentes de biodigestores*. Obtenido de Pastos y Forrajes: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200009&lng=es&tlng=es.
- Cepitá, A. M. (2022). *CO Colombia*. Obtenido de <http://www.cepita-santander.gov.co/>
- Climate Consulting*. (2022). Obtenido de <https://climate.selectra.com/es/que-es/biogas>
- Ecocontenedores. (2022). Obtenido de BioDigestores: <https://www.ecocontenedores.cl/biodigestores/>
- FAO, O. d. (2019). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores: Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (UTF/ARG/020/ARG) - Colección Documentos Técnicos N° 12*. Buenos Aires: Food & Agriculture Org., 2019.
- FAO., G. G. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile.
- Ferrer, I. G. (2009). Pilot project of biogas production from pig manure and urine mixture at ambient temperature in Ventanilla (Lima, Peru). *Waste Management*, 168-173.
- Frederiks, B. (2011). *Biogas bag installation manual for small bag-type plug flow digesters*. Eindhoven, Netherlands: FACT Foundation.
- Gaballah, E. S.-F. (2020). Enhancement of biogas production by integrated solar heating system: A pilot study using tubular digester. *Energy*.
- Garfí, M. C. (2014). Technical, economic and environmental assessment of household biogas digesters for rural communities. *Renewable Energy*, 313-318.
- Garfí, M. G. (2011). Agricultural reuse of the digestate from low-cost tubular digesters in rural Andean communities. *Waste Management*, 2584-2589.
- Garfí, M. M.-H. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 599–614.
- Gómez López, E., Rodríguez Reyez, J., & Torres Martínez, A. (2017). *Implementación de un Biodigestor para el Aprovechamiento de los Residuos de las Granjas Porcinas en el Municipio de Tibana*. Bogotá.

- Google Maps. (2022). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.com/maps/search/Finca+El+L%C3%ADbano,+Cepit%C3%A1++Santander/@6.773014,-72.9606973,884m/data=!3m1!1e3?hl=es>
- Jaramillo Arango, J. G.-E. (2021). Efecto del diseño bioclimático sobre el comportamiento térmico: caso de estudio dos digestores operando bajo condiciones psicrófilas. *RedBioLAC*, 4-8.
- Martí, J. (2008). *Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares*. La Paz.
- Martí, J. (2019). *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación*. Quito.
- Pantoja Cabrera, N., & Parra Paz, S. (s.f.). Obtención de Biogás a partir de Estiércol de Cerdo utilizando un Biodigestor Tipo Tubular. *La investigación al centro*.
- Parra Ortiz, D. B. (2019). Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos. *Revista UIS Ingenierías*, 149-160.
- Porkcolombia., F. N. (2020). *Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia*. Bogotá.
- PropanoGas. (2022). *Fórmula para calcular el consumo de propano en calderas y cocinas*. Obtenido de <https://propanogas.com/faq/consumo-propano>
- RedBiolac., R. d. (2022). *RedBiolac*. Obtenido de <http://redbiolac.org/>
- Rojas Reyes, J., & Ñañez Muñoz, L. (2018). *Diseño e Implementación de un Biodigestor en la Granja Porcícola San Sebastián del Municipio de Timaná – Huila, como Estrategia de Aprovechamiento de los Residuos Generados para la Fertilización de Pasturas y la Generación de Biogás*. .
- Sarapatka, B. (1994). Factors influencing biogas production during full-scale anaerobic fermentation of farmyard manure. *Bioresource Technology*, 17-23.
- Torre Guillén D., A. C. (2009). *Desarrollo de un sistema de biodigestores y energías limpias*. Lima.
- Universidad de Guadalajara, U. (2010). *Universidad de Guadalajara*. Obtenido de <https://www.udg.mx/es/noticia/digestion-anaerobia-contribuye-la-salud-del-medio-ambiente>
- Valencia Potes, O. (1987). *Diseño y Construcción de un Biodigestor de Bajo Costo para Producción de Combustible en Áreas Rurales*.

Por intermedio del presente documento en mi calidad de autor o titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra que adjunto, titulada **Estudio de Viabilidad Técnico - Financiera de la Implementación de un Biodigestor Tubular en la Finca El Líbano, Cepitá – Santander**, autorizo a la Corporación universitaria Unitec para que utilice en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador o titular de la obra objeto del presente documento.

La presente autorización se da sin restricción de tiempo, ni territorio y de manera gratuita. Entiendo que puedo solicitar a la Corporación universitaria Unitec retirar mi obra en cualquier momento tanto de los repositorios como del catálogo si así lo decido.

La presente autorización se otorga de manera no exclusiva, y la misma no implica transferencia de mis derechos patrimoniales en favor de la Corporación universitaria Unitec, por lo que podré utilizar y explotar la obra de la manera que mejor considere. La presente autorización no implica la cesión de los derechos morales y la Corporación universitaria Unitec los reconocerá y velará por el respeto a los mismos.

La presente autorización se hace extensiva no sólo a las facultades y derechos de uso sobre la obra en formato o soporte material, sino también para formato electrónico, y en general para cualquier formato conocido o por conocer. Manifiesto que la obra objeto de la presente autorización es original y la realicé sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es de mi exclusiva autoría o tengo la titularidad sobre la misma. En caso de presentarse cualquier reclamación o por acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión asumiré toda la responsabilidad, y saldré en defensa de los derechos aquí autorizados para todos los efectos la Corporación universitaria Unitec actúa como un tercero de buena fe. La sesión otorgada se ajusta a lo que establece la ley 23 de 1982.

Para constancia de lo expresado anteriormente firmo, como aparece a continuación.

Firma



Laura Lisseth Monsalve Herrera
CC. 1.098.782.425 de Bucaramanga

Por intermedio del presente documento en mi calidad de autor o titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra que adjunto, titulada **Estudio de Viabilidad Técnico - Financiera de la Implementación de un Biodigestor Tubular en la Finca El Líbano, Cepitá – Santander**, autorizo a la Corporación universitaria Unitec para que utilice en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador o titular de la obra objeto del presente documento.

La presente autorización se da sin restricción de tiempo, ni territorio y de manera gratuita. Entiendo que puedo solicitar a la Corporación universitaria Unitec retirar mi obra en cualquier momento tanto de los repositorios como del catálogo si así lo decido.

La presente autorización se otorga de manera no exclusiva, y la misma no implica transferencia de mis derechos patrimoniales en favor de la Corporación universitaria Unitec, por lo que podré utilizar y explotar la obra de la manera que mejor considere. La presente autorización no implica la cesión de los derechos morales y la Corporación universitaria Unitec los reconocerá y velará por el respeto a los mismos.

La presente autorización se hace extensiva no sólo a las facultades y derechos de uso sobre la obra en formato o soporte material, sino también para formato electrónico, y en general para cualquier formato conocido o por conocer. Manifiesto que la obra objeto de la presente autorización es original y la realicé sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es de mi exclusiva autoría o tengo la titularidad sobre la misma. En caso de presentarse cualquier reclamación o por acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión asumiré toda la responsabilidad, y saldré en defensa de los derechos aquí autorizados para todos los efectos la Corporación universitaria Unitec actúa como un tercero de buena fe. La sesión otorgada se ajusta a lo que establece la ley 23 de 1982.

Para constancia de lo expresado anteriormente firmo, como aparece a continuación.

Firma



Omar Fernando Quiñonez Bolívar
CC. 1.098.756.748 de Bucaramanga

Anexo 1

| Caso | Estudio / Investigación | | | | | Lugar de Estudio | | | Biodigestor | Experiencia de éxito |
|------|---|--|---|--|---------------------------------------|--|----------------------|--------------------|------------------|--|
| | Título | Autores | Institución | Tipo de Estudio | Datos de Publicación | Municipio de Ejecución | Temperatura Promedio | Cantidad de Cerdos | Tipo | Aportes, resultados o conclusiones del estudio |
| 1 | Diseño y Construcción de un Biodigestor de Bajo Costo para Producción de Combustible en Áreas Rurales | Oscar Antonio Valencia Potes | Corporación Universitaria Autónoma de Occidente | Trabajo de grado (Programa de Ingeniería Mecánica) | Cali, Valle del Cauca, Colombia, 1987 | Caloto, Cauca | 22°C | 3 | Taiwan o Tubular | Los materiales fueron de fabricación nacional y de consecución local. Las obras de adecuación requirieron de tres jornales, el montaje del Biodigestor tomó tres horas y la producción estable de biogás y fertilizante se obtuvo 50 días después de su instalación. El Biodigestor con las dimensiones expuestas en el estudio, produjo continuamente combustible suficiente para seis horas diarias de cocción y esto permitió la preparación de los alimentos consumidos a diario por una familia campesina, requiriendo para su funcionamiento de las excretas producidas diariamente por una vaca, un caballo y tres cerdos de cría. Vida Útil de 8 años. |
| 2 | Producción de Biogás a partir de Estiércol Porcino a Escala Piloto: Casa de Estudio Biorreactor Continuo Tubular Plástico (BCTP) Finca Tosoly | Carlos Didier Bayona Páez Brayan Steek Cortés Luengas | Universidad Industrial de Santander | Trabajo de grado Programa de Ingeniería Química | Bucaramanga Santander 2015 | Finca Tosoly Vereda: Morario Municipio: Guapotá Departamento: Santander | 23°C | 20 | Taiwan o Tubular | El Bioreactor continuo tubular plastico, a la fecha de 2015 tenía 15 años de haber sido instalado y estaba operativo El biodigestor presentó un desempeño favorable dado que para una carga de 1:7 excretas-aguas alcanzó un rendimiento en producción de biogás entre 0.4 – 0.5 m ³ /día. Tosoly es un modelo de finca autosuficiente y ecológicamente sostenible La finca es reconocida por ser el epicentro de educación y manejo de recursos naturales como una forma de asegurar el cubrimiento de las necesidades alimentarias y energéticas de la sociedad. |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|--|--|--|---|---|------|----|------------------|---|
| 3 | Factibilidad de la Implementación de un Biodigestor que Transforme Estiércol de Porcino en Biogás y Biofertilizante para la Venta Comercial, en la Finca La Primavera, Municipio De Lejanías, Meta. | Jorge Alfonso Castaño Orjuela | Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD | Trabajo de grado Programa de Tecnología en Sistemas Agroforestales | Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente – ECAPMA Acacías Meta 2017 | Finca La Primavera Vereda: Tres Estrellas Municipio: Lejanías Departamento: Meta | 26°C | 86 | Taiwan o Tubular | <p>El cálculo del tiempo de retención ideal para el lugar fue de 26 días, estimando que el volumen de diseño del biodigestor debería ser de 21 metros cúbicos</p> <p>Se estimó que el biodigestor propuesto podría producir 363,78 metros cúbicos de biogás al mes</p> <p>El biogás fue considerado como el principal motor de generación de ingresos, debido a la gran cantidad de estiércol generado por los porcinos presentes en la finca, sin embargo, se evidenció que el subproducto biofertilizante (biol y biosol) podría generar utilidades reflejadas tanto en ventas y salidas a mercados dinámicos</p> <p>Los cuatro índices de valoración económica (Valor Presente Neto, Tasa Interna de Retorno, Relación Beneficio Costo, Índice de Valor Actual Neto) considerados dentro del trabajo demostraron la amplia factibilidad del proyecto con las características planteadas.</p> |
| 4 | Implementación de un Biodigestor para el Aprovechamiento de los Residuos de las Granjas Porcinas en el Municipio de Tibana | Esther Nayive Gómez López, José Samuel Rodríguez Reyez, Angela Torres Martínez | Universidad Católica de Colombia | Especialización Formulación y Evaluación Social y Económica de Proyectos | Bogotá, Cundinamarca, Colombia, 2017 | Tibaná, Boyacá | 16°C | | Taiwan o Tubular | <p>Una vez realizado el estudio de investigación del proyecto y de haber analizado el estudio técnico, financiero y ambiental teniendo como resultado que no fue viable debido al resultado de la TIR de -0,32% y un VPN de \$ -30.049.790 negativa en donde el retorno de la inversión que se había establecido con la generación y venta de energía eléctrica y bioabono no es suficiente ya que el retorno de la inversión se comenzaría a ver a partir del cuarto año, en consecuencia el proyecto no es viable a corto y mediano plazo pero se estableció que a largo plazo podría ser favorable la implementación del biodigestor.</p> |
| 5 | : Diseño e Implementación de un Biodigestor en la Granja Porcícola San Sebastián del Municipio de Timaná – Huila, como Estrategia de Aprovechamiento de los Residuos Generados para la Fertilización de Pasturas y la Generación de Biogás. | Jhon Faiver Rojas Reyes Liliana Ñañez Muñoz | Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD | Trabajo de grado Programa de Agronomía e Ingeniería Forestal | Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente – ECAPMA Pitalito Huila 2018 | Granja Porcícola San Sebastián Vereda: Piragua Municipio: Timaná Departamento: Huila | 23°C | 81 | Taiwan o Tubular | <p>Se contruyó dos biodigestores tipo tubular, obteniendo 52,1 metros cúbicos de biogás por día</p> <p>El proyecto benefició 4 familias debido a la reducción de costos a un 50% asociados al consumo de GLP y aprovechamiento del Biol como abono orgánico para pasturas</p> <p>Se contrarrestó los efectos negativos en la producción porcícola asociados a los malos olores, plagas, enfermedades estomacales por la contaminación a fuentes hídricas</p> <p>Los biodigestores plásticos de flujo continuo son de bajo costo, fácil construcción y mantenimiento</p> |